

Diplomová práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra Mikroelektroniky

## System bezdrátového sběru dat

**Bc. Vladimír Čebiš**

Vedoucí práce: Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.

Obor: Elektronika

Studijní program: Elektronika a komunikace

Květen 2020



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Čebiš** Jméno: **Vladimír** Osobní číslo: **434935**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**  
Specializace: **Elektronika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Systém bezdrátového sběru dat**

Název diplomové práce anglicky:

**Wireless Data Acquisition System**

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a implementujte bezdrátový systém sběru dat. Řiďte se následujícími pokyny:

- 1) Proveďte analýzu dostupných řešení s ohledem na nízkou spotřebu jednotlivých komponent systému.
- 2) Navrhněte a implementujte systém sběru dat. Systém se skládá z centrální jednotky, která bezdrátově komunikuje s měřicími moduly.
- 3) Bezdrátové měřicí moduly mají digitální rozhraní pro připojení senzorů neelektrických veličin a analogové rozhraní pro připojení tenzometru.
- 4) Bezdrátové měřicí moduly mohou pracovat v online (komunikují s centrální jednotkou) nebo offline (ukládají data lokálně na paměťové médium) režimu.
- 5) Celý systém otestujte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] HARRISON, R. Giles. Meteorological Measurements and Instrumentation. Wiley-Blackwell, 2015. 257s. ISBN 978-1-118-74580-9.  
[2] MICRORISC s.r.o. IQRF OS OperatingSystemVersion 4.00D for (DC)TR-7xD - User'sGuide. 2017. [online] Dostupné z: <http://www.iqrf.org>.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Stanislav Vítek, Ph.D., katedra radioelektroniky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **29.01.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2021**

\_\_\_\_\_  
Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce Ing. Stanislavovi Vítkovi, Ph.D. za cenné připomínky, rady a hlavně čas, který mi věnoval při vzniku této diplomové práce.

Poděkování patří i všem kamarádům a rodině, kteří mi byli oporou. Především děkuji Bc. Janu Vomočilovi za společně strávený čas u konzultací a hlavně těm, kteří to se mnou během vývoje neměli úplně snadné a i přesto mě podpořili.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 22. května 2020

## Abstrakt

Práce se zabývá komplexním návrhem a realizací bezdrátového systému sběru dat určeného k měření a monitorování konstrukčních deformací doplněný o interní měření teploty, barometrického tlaku a vlhkosti. Jednotka může pracovat offline, kde se data ukládají lokálně na paměťové médium, nebo online, kde se využívá bezdrátové technologie IQRF.

Ve výsledném řešení je zohledněna co nejmenší možná spotřeba elektrické energie, jednoduché ovládání a vyšší stupeň krytí pro venkovní použití.

**Klíčová slova:** Systém bezdrátového sběru dat, monitorování a měření konstrukčních deformací, měřicí potenciometry, tenzometrické snímače, odporové snímače, Wheatstoneův můstek, Dallas DS18B20, STM32L072CBT6, SD karta, 3D-tisk, 3D-tisk post processing , SPI, I<sup>2</sup>C, fuel gauge, IQRF

**Vedoucí práce:** Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.

## Abstract

Diploma thesis deals with design and implementation of wireless data acquisition system designed for measurement and monitoring of construction deformations supplemented with internal measurement of temperature, barometric pressure and humidity. The unit can work offline and data will be stored locally on a storage medium or online using wireless IQRF technology.

The whole solution is designed for the lowest current consumption, easy to use and for outdoor use.

**Keywords:** Wireless Data Acquisition System, monitoring and measurement of construction deformations, linear potentiometers, strain gauge sensor, resistance sensors, Wheatstone Bridge, Dallas DS18B20, STM32L072CBT6, SD card, 3D print, 3D print post processing, SPI, I<sup>2</sup>C, fuel gauge, IQRF

**Title translation:** Wireless Data Acquisition System

## Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>	6.5 Sběrnice	37
1.1 Monitorování stavebních objektů	2	6.5.1 I <sup>2</sup> C	37
<b>2 Metody sledování poruch</b>	<b>3</b>	6.5.2 SPI	38
2.1 Zařízení pro měření trhlin	3	6.5.3 1-Wire	38
2.1.1 Sádrové destičky	3	6.6 Napájecí část	38
2.1.2 Trhlinoměry	4	6.6.1 Nabíjení	39
2.1.3 Tyčové dilatometry	5	6.6.2 Baterie	40
2.1.4 Elektrické snímače	5	6.6.3 Stabilizátor	41
<b>3 Dostupná řešení na trhu</b>	<b>9</b>	6.6.4 Záložní zdroj	42
3.1 CK-102	9	6.6.5 Stav baterie	42
3.2 USB PT-104	9	6.7 Power management a konektory	43
3.3 TC-200	10	6.8 Tenzometry	44
3.4 Datalogger DATATAKER	11	6.8.1 Nastavení zesílení	45
3.5 Rissfox Mini	11	6.9 LCD displej a ovládací prvky	46
3.6 Používané řešení v KÚ	12	6.10 Ochrany	48
3.6.1 Způsob komunikace	14	6.11 SD karta	48
3.6.2 Ukázka aplikace	14	6.11.1 Soubory	49
3.7 Shrnutí	16	6.12 IQRF	50
<b>4 Senzory</b>	<b>17</b>	6.12.1 Způsob komunikace	52
4.1 Rozdělení	17	6.13 Konstrukce - 3D tisk	55
4.2 Parametry	18	<b>7 Realizace vlastního řešení</b>	<b>59</b>
4.3 Převod	18	7.1 DPS	60
4.4 Senzory polohy	19	7.1.1 Revize	60
4.5 Tenzometry	20	7.1.2 Finální verze	62
4.5.1 Rozdělení	21	7.2 Osazení, oživení a testování	64
4.5.2 Měření	22	7.3 Uživatelské rozhraní	65
4.5.3 Aplikace	24	7.4 Program	67
4.6 Měření teploty	25	7.5 Konstrukce	68
4.6.1 Elektrické senzory teploty	25	7.5.1 Holder DPS	70
4.7 Shrnutí	26	7.5.2 Výsledný box	71
<b>5 Bezdrátové komunikační technologie</b>	<b>27</b>	7.5.3 Rozměry	72
5.1 Wi-Fi	27	7.6 Spotřeba a testování	73
5.2 Bluetooth Low Energy (BLE)	28	<b>8 Návod a postupy</b>	<b>77</b>
5.3 ZigBee	28	8.1 Obsluha zařízení	77
5.4 IQRF	28	8.2 Osazování & ožívování	78
5.5 LoRa	29	8.3 3D tisk & kompletace boxu	80
5.6 Sigfox	29	<b>9 Cenová kalkulace</b>	<b>83</b>
<b>6 Návrh vlastního řešení</b>	<b>31</b>	<b>10 Závěr</b>	<b>85</b>
6.1 Požadavky	31	<b>Literatura</b>	<b>87</b>
6.2 Blokové schéma	32	<b>A Seznam zkratk</b>	<b>91</b>
6.3 Použité senzory	32	<b>B Použitý software a přístroje</b>	<b>93</b>
6.4 Mikrokontrolér	34	B.1 Software	93
6.4.1 Low power mody	36	B.2 Přístroje	94

<b>C</b>	<b>Obrázky realizace</b>	<b>95</b>
<b>D</b>	<b>Kompletní kalkulace a seznam součástí</b>	<b>99</b>
<b>E</b>	<b>Kompletní schéma zapojení</b>	<b>103</b>



## Obrázky

1.1 Výsledný model jednotky - černo-modrý design	1	6.3 Lineární tenzometr s 1 měřicí mřížkou [31]	33
2.1 Způsob osazení sádrové destičky [4]	4	6.4 Sonda s teplotním čidlem DS18B20 [32]	33
2.2 Trhlinoměrka [5]	4	6.5 Senzor BME280 v pouzdře LGA8 [32]	34
2.3 Hollanův příložený dilatometr [6]	5	6.6 STM32L v pouzdře LQFP48	34
2.4 Měření trhlin pomocí kamery [7]	5	6.7 Přehled STM32 řady L	35
2.5 Digitální měřič trhlin GINGERCEBTP [7]	6	6.8 Napájecí část	39
2.6 Potenciometrický lineární snímač [7]	6	6.9 Napájecí část USB	39
2.7 Monitorování trhliny pomocí senzoru a dataloggeru [7]	7	6.10 Napájecí část BatteryCharger	40
2.8 Monitorování trhlin pomocí senzorů a dataloggeru [7]	7	6.11 Napájecí část baterie	40
3.1 Ukazatel šířky trhliny CK-102 [8]	9	6.12 Napájecí část LDO	41
3.2 Datový záznamník USB PT-104 [9]	10	6.13 Napájecí část superCap	42
3.3 Měření trhlin v betonu TC-200 [10]	10	6.14 Napájecí část Fuel Gauge	43
3.4 Datalogger DATATAKER DT90L [11]	11	6.15 Power management & konektory	43
3.5 Rissfox Mini [12]	12	6.16 Power management realizace	44
3.6 Původní měřicí zařízení na vývojové desce	13	6.17 Návrh části tenzometrů	45
3.7 Původní měřicí ústředna na bázi Wemos TTGO ESP32/LoRa	13	6.18 Typické zapojení zesilovače v můstku [38]	45
3.8 Senzor pro měření pohybu	15	6.19 Displej OLED 0,96"	47
3.9 Měřicí zařízení umístěné na kůru	15	6.20 Obvod pro potlačení zákmitů tlačítka	47
4.1 Rozdělení tenzometrů [20]	21	6.21 4 kanálová ESD ochrana	48
4.2 Příklady tenzometrů [18]	21	6.22 Micro SD karta SPI mód	49
4.3 Změna odporu vodiče při natažení	22	6.23 Blokové schéma IQRF modulu - TR-72D	51
4.4 Základní zapojení Wheatstonova můstku	23	6.24 Schéma zapojení TR-72D	52
4.5 Poloviční Wheatstoneův můstek	23	6.25 2 verze boxu	56
4.6 Čtvrtinový Wheatstoneův můstek	23	6.26 3 verze boxu	57
4.7 Aplikace plného můstku [21]	24	7.1 Výsledná model osazené DPS ve vytisknutém rámečku	59
4.8 Aplikace polovičního můstku [21]	24	7.2 Vstupní zvlnění DC/DC měniče revize1	61
4.9 Aplikace čtvrtinového můstku [21]	24	7.3 Výstupní zvlnění DC/DC měniče revize1	61
5.1 Srovnání bezdrátových technologií [23]	27	7.4 Model DPS finální revize 3 TOP	62
6.1 Blokové schéma finální verze	32	7.5 Model DPS finální revize 3 BOTTOM	62
6.2 Lineární potenciometrický snímač MM10 [30]	33	7.6 Model DPS finální revize 3 popis	63
		7.7 Původní ESD ochrany	64
		7.8 Menu systém	65
		7.9 Ukázka MENU - MAIN	65
		7.10 MENU	66
		7.11 Vývojový diagram	67
		7.12 Ventily boxu	68

7.13 Výsledný model boxu .....	69
7.14 Výsledný model pootevřeného boxu .....	69
7.15 Rozklad DPS - rámeček .....	70
7.16 Rozklad boxu .....	71
7.17 Rozměry boxu .....	72
7.18 Rozměry holderu .....	72
7.19 Spotřeba zařízení v RUN módu	73
7.20 Spotřeba zařízení ve SLEEP módu bez IQRF .....	74
7.21 Závislost teploty a vlhkosti na čase z BME280 .....	74
7.22 Závislost napětí a kapacity baterie na čase .....	75
7.23 Závislost připojených senzorů LIN1, LIN2 a TENS2 na čase .....	75
7.24 Dosah IQRF na přímou viditelnost .....	76
8.1 Osazený mikrokontrolér na desce plošných spojů .....	78
8.2 Debugování sběrnice I <sup>2</sup> C .....	79
8.3 Ukázka výsledné úpravy vytisknutého dílu .....	81

## Tabulky

5.1 Porovnání technických parametrů technologií .....	30
6.1 Porovnání STM32L0 low-power módů [33] .....	37
6.2 SPI status .....	52
6.3 Struktura zprávy .....	53
6.4 IQRF ukázka komunikace po SPI	53
6.5 DPA struktura .....	53
6.6 Struktura zpráv PDATA .....	54
6.7 Struktura zpráv PDATA Koordinátor - příklad .....	54
6.8 Struktura zpráv PDATA Node - příklad .....	54
6.9 Vysvětlivky - struktura zpráv PDATA .....	55
7.1 Seznam základních dílů a prvků	70
7.2 Seznam dílů pro BOX .....	71
7.3 Porovnání spotřeby zařízení ....	73
7.4 Ukázka naměřených dat z jednotky .....	76
9.1 Výsledná kalkulace za jeden kus	83
D.1 Seznam součástek integrované obvody a pasivní součástky .....	100
D.2 Seznam součástek polovodiče a konektory .....	101

# Kapitola 1

## Úvod

Moje práce se zabývá řešením energeticky nenáročného bezdrátového systému sběru dat určeného k měření a monitorování deformací stavebních konstrukcí. Je zde popsán kompletní návrh, realizace, cenová kalkulace a obsluha zařízení. Jednotka by měla být schopná měřit posun a deformaci trhlin a jiných poruch pomocí lineárních potenciometrů a tenzometrických fólií. Obsahuje uživatelské rozhraní, malou zobrazovací jednotku v podobě OLED 1,3", slot pro osazení microSD karty a slot pro osazení bezdrátového modulu IQRF. Dále je možné připojit externí digitální teplotní čidlo DS18B20. Jednotka je osazena interním čidlem pro měření teploty, vlhkosti a barometrického tlaku. Zdroj elektrické energie zajišťuje jedna Li-ion baterie 18650.



**Obrázek 1.1:** Výsledný model jednotky - černo-modrý design

V práci jsou první čtyři kapitoly věnovány seznámení s danou problematikou. Nejprve uvedu a krátce popíši metody sledování poruch, poté porovnáám dostupná řešení na trhu, a v poslední části popíšu na jakých principech fungují senzory, které využívám ve svém zařízení. V kapitole pět uvedu stručný přehled bezdrátových komunikačních technologií. Kapitola šest je nejrozsáhlejší, protože se zabývá návrhem vlastního řešení, kde jsou popsány všechny použité prvky. Kapitola sedm popisuje postup při realizaci zařízení se shrnutím užitečných poznatků od návrhu schématu, oprav a úprav DPS, které jsem řešil během vývoje zařízení. Kapitola sedm bude obsahovat také popis softwarového řešení jednotky a informace ohledně 3D tisku, který jsem využil pro realizaci boxů, do kterých se umístí výsledná osazená DPS.

V závěru práce uvedu návod pro obsluhu zařízení, cenovou kalkulaci a celkové shrnutí realizace.

## 1.1 Monitorování stavebních objektů

Monitorování stavebních objektů je jedním z hlavních nástrojů pro hodnocení existujících konstrukcí. Pokyny pro návrh oprav nebo modernizaci poskytuje ČSN ISO 13822, která uvádí přímo mezinárodně platné postupy hodnocení spolehlivosti existujících konstrukcí.[1] Výskyt poruch v objektech je zcela běžnou záležitostí. Poruchy se nejčastěji projevují trhlinami a nejdůležitější je určení závažnosti a nebezpečnosti vzniklých poruch.

Monitorováním se rozumí dlouhodobá a soustavná činnost, prováděná kontinuálně, nebo v pravidelně se opakujícím intervalu. Na základě dat z daného monitorování, kde se většinou sledují pohyby, posuny či deformace, může statik lépe rozhodnout o stavu objektu a jak efektivně vynaložit finanční prostředky. Z výsledků monitorování musí být jasné, zda dochází ke konsolidaci, k úplné stabilizaci stavu nebo v opačném případě jestli dochází stále k pohybům nebo se stav stále zhoršuje či dokonce eskaluje.

U starších objektů se provádí monitoring na žádost statika a to v případě, jde-li o objekty, které jsou již porušeny. Monitorování má zjistit, o jaké poruchy se jedná, zda-li jde o aktivní trhliny, ve kterých dochází k posunům, nebo k ustálení neaktivní trhliny. Jde tedy o poruchy, které vzbuzují určitou obavu z hlediska únosnosti či použitelnosti konstrukce. Dalším případem jsou stavby, které nejsou porušeny, ale lze očekávat v souvislosti s okolní činností, že dojde k nějakému vytvoření poruch, nebo k jejich zvětšování. Může se jednat o vedlejší výstavbu domu, provádění podzemní stavby, rekonstrukce a jiné zásahy v okolí objektu. V některých případech je vhodné provést kontrolu a monitorování objektu ještě před zahájením a poté v průběhu výstavby. Lze tím zamezit případným sporům týkajících se původu poruch v objektech dotčených výstavbou. [1][2]

Příčinou vzniku poruch bývá nejčastěji deformace základových konstrukcí, deformace krovů, vlhkost, přetížení samotného prvku nebo činnost probíhající v okolí. Musíme zahrnout i faktory, které působí na konstrukci během jejího užívání, a to například různé přestavby, zanedbaná údržba, katastrofické faktory, střídání majitelů a jejich různé požadavky v užívání konstrukce.

## Kapitola 2

### Metody sledování poruch

Monitoring probíhá v několika fázích, nejdříve se provede podrobná prohlídka a stanoví se účel měření, dále se vypracuje metodika a časový průběh tohoto měření. Konečným výsledkem je stanovení velikosti vratného a trvalého posunu.[3]

#### 2.1 Zařízení pro měření trhlin

Trhliny jsou viditelným projevem napětí, které překročilo mez pevnosti daného materiálu při určitém způsobu namáhání. Každá trhлина svědčí o pohybu příslušné části stavby. Podle množství, tvaru, šířky a místa trhlin v konstrukci je možno posoudit příčinu a závažnost poruchy.[1]

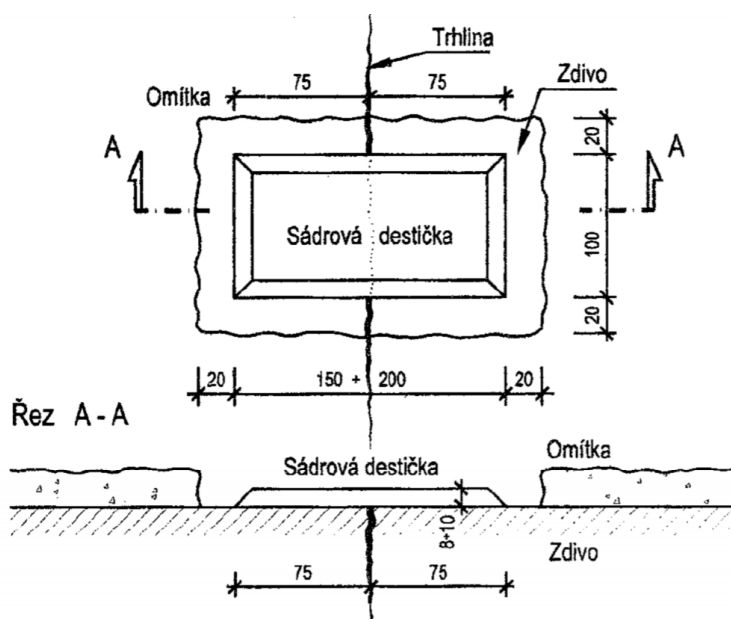
Měření posunů v trhlinách je měřením téměř vždy relativním, jedná se o měření dvou bodů vůči sobě, měření tedy není vztaženo k pevné soustavě. Pro měření posunů v trhlinách a poměrných deformací se používá celá řada měřících přístrojů a můžeme je dělit na:

- **běžná měřidla** – jedná se například o primitivní ukazatele posunů, jako jsou například sádrové terčíky a trhlínoměrky,
- **mechanické snímače** – například tyčové dilatometry, které jsou osazeny úchylkoměrem,
- **elektrické snímače** – přístroje určené pro kontinuální měření posunů trhlin,
- **geodetické zařízení a přístroje** – které se uplatňují při dlouhodobém sledování posunů a deformací stavebního objektu.

##### 2.1.1 Sádrové destičky

V současné době se pro potřeby monitorování a měření trhlin v konstrukci dá použít i primitivních ukazatelů posunů, jako jsou například sádrové terčíky 2.1. Jedná se o jednu z nejběžnějších metod sledování rozvoje trhlin ve zděných i železobetonových stěnách. Princip sledování spočívá v umístění sádrového terčíku příčně přes trhlinu a řádně ukotveného ke zdivu po obou stranách.

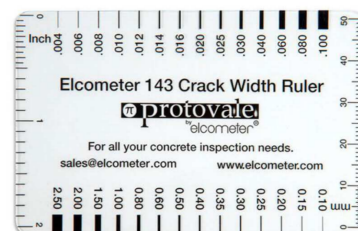
Při nepatrném pohybu trhliny se terčík přetrhne a v sádře vznikne vlasová trhlinka. Podle tvaru a velikosti trhlinky v čase lze usuzovat na to, jak rychle k pohybu dochází, v jakém směru se jednotlivé části stěny navzájem pohybují a následně usuzovat i na to, jak je to nebezpečné z hlediska statiky domu. Není to rozhodně příliš vhodná metoda, je to však názorná metoda pro uživatele, který okamžitě ví, že dochází k určitým změnám na konstrukci. Je však použitelná pouze v tom případě, že dochází k trvalému rozšiřování trhlin, pokud se jedná o střídavý pohyb vlivem změny teploty, pak tyto sádrové terčíky jsou naprosto nefunkční.



Obrázek 2.1: Způsob osazení sádrové destičky [4]

### 2.1.2 Trhlinoměry

Další způsob měření trhlin je pomocí trhlinoměry nebo jinak řečeno pravítka na měření trhlin. Jde o metodu komparační, kdy se porovnává šířka trhliny se stupnicí na trhlinoměře. Při měření trhlin na povrchu omítky nastává problém, že šířka trhlin na povrchu se nemusí shodovat s šířkou trhlin v nosné konstrukci. Při použití trhlinoměry přímo na nosné konstrukci nastává problém s rozlišením šířky trhliny, což komplikuje měření. Jedná se tedy opět o orientační měřidlo, sloužící spíše pro popis trhlin, vyskytujících se spíše v omítce. Pro dlouhodobější měření se trhlinoměry nepoužívají.



Obrázek 2.2: Trhlinoměra [5]

### 2.1.3 Tyčové dilatometry

Principem je měření rozdílu vzdáleností mosazných terčů osazených přes trhlinu a rozevřené spáry v panelech ve vzdálenosti přibližně 200 mm. Jedním z těchto měřidel je Hollanův příložný dilatometr viz.obr.2.3 , který má základní délku 200 mm nebo 500 mm. U těchto měřidel je velmi výhodná jejich přesnost daná digitálním či ručičkovým úchylkoměrem. Další výhodou spočívá v tom, že se měří vzdálenost dvou osazených bodů (terčů), tyto terčíky jsou navíc vyrobeny tak, že geometrie konstrukce neovlivňuje měření, a proto se dají použít i u kleneb.[1][6]



Obrázek 2.3: Hollanův příložný dilatometr [6]

### 2.1.4 Elektrické snímače

V kategorii elektrických snímačů můžeme nalézt širokou škálu produktů, které jsou založené na rozdílných principech vyhodnocování. První z uvedených je například měřič šířky trhlin založený na vizuálním mnohonásobném zvětšení trhliny pomocí mini kamery viz.obr.č.2.4.



Obrázek 2.4: Měření trhlin pomocí kamery[7]

Další zařízení je digitální měřič trhlin GINGERCEBTP, u kterého se nejdříve osadí podpory na obě strany trhliny. Poté se pro určení přesné vzdálenosti základen použije etalon přesně kalibrovaných parametrů. Šířka trhliny se měří tak, že se zařízení přiloží mezi osazené podpory a na základě pohybu podpor se na digitálním displeji odečte změna šířky trhliny. Příklad použití je uveden na obr.č.2.5



Obrázek 2.5: Digitální měřič trhlin GINGERCEBTP [7]

Pokud monitorování trhlin vyžaduje záznam, je vhodné zvolit například lineární potenciometrický snímač polohy 2.6, který je připojen k vyhodnocovací jednotce.



Obrázek 2.6: Potenciometrický lineární snímač [7]

Vyhodnocovací jednotka zpracovává a zaznamenává měřená data 2.72.8. Většinou je lze nalézt pod názvem měřicí ústředna, datalogger či zapisovač. Obecně lze senzory připojit k PLC řídicím automatům, v češtině označované jako programovatelné automaty. Každé takové zařízení je určeno pro specifické použití a může mít rozdílné vlastnosti než zařízení jiné. Proto je důležité vhodným způsobem vybrat zrovna to, které vyhovuje.

Mezi hlavní rysy patří především:

- **druh napájení** – síťové či bateriové. U bateriově napájené jednotky nás bude zajímat druh a výdrž baterie, která se bude odvíjet od počtu připojených senzorů;
- **možnosti ukládání a případné sdílení dat** – u ukládání dat nás bude zajímat paměťové médium, jestli se jedná např. o úložiště na SD



kartě, či o úložiště ve vnitřní paměti zařízení. Sdílení a poskytování dat jinému zařízení je u starších modelů zajištěno většinou průmyslovou sběrnici RS232, která je odolným a osvědčením řešením, nicméně vzniká problém nutné instalace kabeláže. Proto u novějších modelů probíhá sdílení dat pomocí bezdrátového přenosu;

- **počet vstupních kanálů a typ** – v podstatě se jedná o veškeré vlastnosti vstupních pinů, mezi které můžeme řadit přesnost, rozsah a požadavky pro použitelné senzory;
- **typ podporovaných senzorů** – jedná-li se o senzory odporové lineární, tenzometrické, ultrazvukové, kapacitní, laserové a jiných speciálních;
- **uživatelská obsluha** – která se skládá ze zobrazovací jednotky a uživatelských tlačítek;
- **cena zařízení a servis.**



Obrázek 2.7: Monitorování trhliny pomocí senzoru a dataloggeru[7]



Obrázek 2.8: Monitorování trhlin pomocí senzorů a dataloggeru[7]

V této kapitole jsou shrnuty základní postupy, průběh a způsob monitorování při vyhodnocování trhlin a deformací v konstrukcích. V další kapitole rozeberu dostupná řešení v oblasti vyhodnocovacích jednotek.



## Kapitola 3

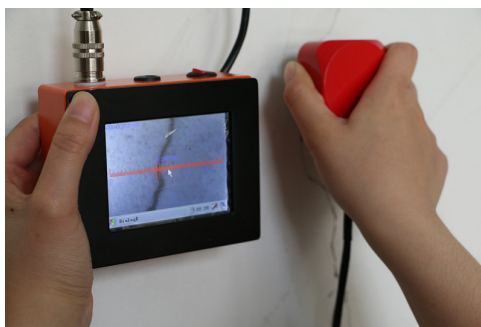
### Dostupná řešení na trhu

V současné době pro potřeby monitorování konstrukcí se využívá komerčních měřicích ústředěn, nebo jiných zařízení na míru. Uvedu zde pět rozdílných řešení, ze kterých se dvě podobají nejvíce tématu mé diplomové práce. Bohužel většina zařízení je určena pro průmysl, a proto nemohu u všech uvést cenu.

#### 3.1 CK-102

Měřič šířky trhliny se používá hlavně pro přesnou detekci mostů, tunelů, budov, betonové dlažby, kovového povrchu a tak dále. Systém dokáže automaticky zachytit obraz prasklin a obrázků v reálném čase a jejich šířku. Obrázková data mohou být uložena automaticky. Zařízení zobrazuje šířku trhliny na obrazovce. Sonda je doplněna o osvětlení.

Základní parametry: maximální rozsah detekce 0 až 6 mm, přesnost lepší než 0,01 mm, zvětšení až 40 krát, úložiště SD karta, zdrojem napájení je lithiová baterie, výdrž je řádově v jednotkách hodin. [8]



Obrázek 3.1: Ukazatel šířky trhliny CK-102 [8]

#### 3.2 USB PT-104

Jedná se o data logger od firmy Picotech, který měří a zaznamenává až čtyři odporové teploměry jako jsou PT100 a PT1000. Dále podporuje připojení až čtyř lineárních potenciometrů. Napájení zařízení je zajištěno pomocí USB nebo Power-over-Ethernet(PoE). Výrobce poskytuje volně stažitelný software,

kde je možné vidět změny v závislosti na čase. Rozsah připojitelných odporů je 0 až 375  $\Omega$  a 0 až 10 k $\Omega$ . Z tohoto usuzuji, že je jednotka vybavena přepínatelným rozsahem. Rozlišení uvádí výrobce 24 bitů, což je naprosto zbytečné pro měření odporového děliče. Výrobce má uvedeno na trhu více variant, ale žádná nedisponuje baterií. [9]

Přibližná cena jednoho zařízení je 20 000 Kč. [9]



**Obrázek 3.2:** Datový záznamník USB PT-104 [9]

### 3.3 TC-200

Přístroj TC-200 je určený pro měření hloubky trhlin v betonu za použití principu akustického lomu od výrobce INNOVATEST. Je rovněž možné jej použít pro měření šíření zvuku ultrazvuku v betonu. Přístroj TC-200 má automatickou detekci, paměť naměřených dat a výstup. Sdílení dat je zajištěno pomocí průmyslové sběrnice RS232. Bateriově napájeno 6x AA baterií. [10]



**Obrázek 3.3:** Měření trhlin v betonu TC-200 [10]

## 3.4 Datalogger DATATAKER

Jedná se o měřicí ústředny z produkce australské společnosti Datataker Pty Ltd. Výrobce má uvedeno na trhu přibližně 15 variant. Uvádím zde pro mě nejzajímavější zařízení, a to DATATAKER DT90L.

Tento logger je určený pro dlouhodobé monitorování v aplikacích pro sledování počasí, vodohospodářství a průmyslu. Obsahuje 4G modem pro vzdálený přístup a USB rozhraní pro lokální obsluhu. Konfigurace alarmů je možné nastavit prostřednictvím sms zpráv. K loggeru je možné připojit analogové senzory, jako jsou lineární potenciometrické snímače, a disponuje i digitálním rozhraním s podporou standardů SDI-12 a MODBUS skrz port RS485. Na jedno nabití baterií má zařízení vydržet až 300 dní a je možnost i připojení solárního panelu. Verze DT90L disponuje baterií o velikosti 48 Wh. Celé řešení je voděodolné dle IP68.[11]



Obrázek 3.4: Datalogger DATATAKER DT90L [11]

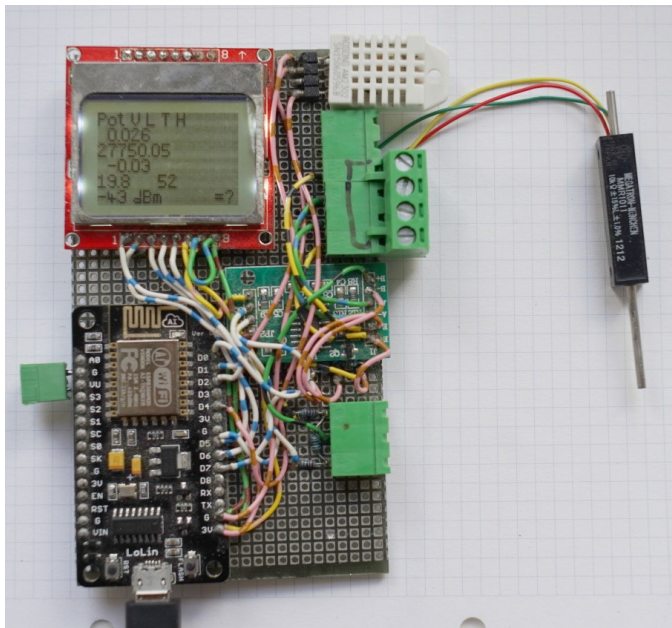
## 3.5 Rissfox Mini

Je zařízení od německé firmy Scanttronik Mugrauer GmbH, které zaznamenává změny délky trhlín, relativní/absolutní vlhkost a teplotu vzduchu. V popisu produktu uvádí výrobce revoluční digitální technologii CMOSens® a vysoké rozlišení.

CMOSens® je technologie společnosti Sensirion, kterou využívá Rissfox Mini. V podstatě se jedná o MEMS, ve kterém je vše potřebné integrováno. Jedná se o technologii, která je použita u senzoru vlhkosti a teploty.

Rissfox Mini disponuje 12bitovým rozlišením pro měření lineárních potenciometrů. Zařízení má být nárazuvzdorné a vodotěsné. Zdrojem energie jsou dvě baterie AA, které mají vydržet, dle výrobce, až dva roky. Dále výrobce uvádí režim vysokorychlostního sledování trhlín, kde se přibližně 100x za sekundu zaznamená měřená hodnota. Data jsou ukládány na vnitřní úložiště a načtení do PC je umožněno pomocí USB rozhraní. Výrobce dodává i software pro

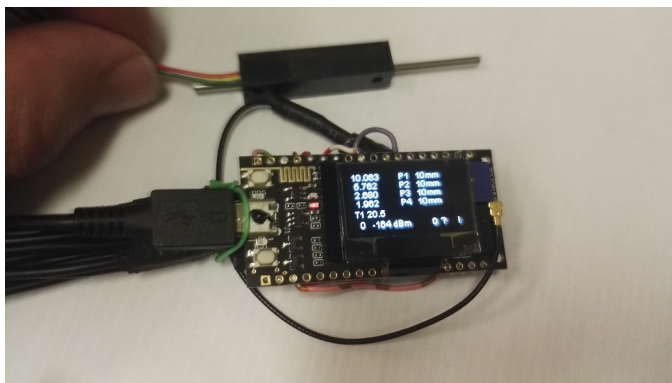




Obrázek 3.6: Původní měřicí zařízení na vývojové desce

Pro napájení jsou použity lithiové baterie a síťový zdroj. Spotřeba při plném provozu je v průměru asi 100 mA. To umožňuje například celodenní měření při zatěžovacích zkouškách konstrukcí při rychlém vzorkování a plné využití zařízení. Je zde také možnost několika úsporných režimů, tj. automatické vypínání mezi měřeními při dlouhé periodě vzorkování, což prodlouží využití energie z akumulátoru na několik měsíců.

Velkým zjednodušením bylo uvedení výrobku Wemos TTGO ESP32/LoRa board, což je chipset, který v sobě na jedné desce již obsahuje klíčový používaný hardware, tj. zejména procesor ESP32, flash paměť, WiFi a LoRa modem. Měřicí ústředna na této technologii je zobrazena na obr.č. 3.7



Obrázek 3.7: Původní měřicí ústředna na bázi Wemos TTGO ESP32/LoRa

### 3.6.1 Způsob komunikace

Měřicí zařízení může komunikovat v několika režimech. Ověřeny byly tři následující:

- **USB/RS232** – slouží pro připojení přímo na PC, je určeno pro nastavení ústředny i sběr dat. Pomocí tohoto rozhraní lze nastavovat parametry bezdrátových sítí, adresu vzdáleného serveru, kam se odesílají data, intervaly vzorkování, nahrávat konfigurační soubor apod. Jednoduchá nápověda (menu) se zobrazí po stisknutí klávesy „h“ v terminálu RS232;
- **WiFi** – měřicí ústředna může být připojena pomocí sítě WiFi a odpovídajícího modemu (např. GSM) na internet. Data jsou potom odesílána pomocí protokolu UDP na server, kde jsou dále zpracovávána. Tento způsob byl použit při monitorování v kostele Sv. Martina ve Zlaté Olešnici;
- **LoRa** – Dalším způsobem připojení je síť LoRa, a to vytvořená mezi měřicími ústřednami. Jedno nebo více zařízení je v dosahu WiFi modemu. Ostatní měřicí ústředny se přes toto, resp. tato, zařízení připojují pomocí bezdrátového systému LoRa, který má větší dosah a je méně energeticky náročný. Viz také „Ověření dosahu signálů WiFi a LoRa“.

### 3.6.2 Ukázka aplikace

Kostel Sv. Martina byl postaven v letech 1780–1784 v pozdně barokním slohu. Jedná se o jednolodní stavbu se segmentově uzavřeným presbytářem. Na jižní straně se nachází sakristie a v západním průčelí má kostel hranolovou věž s věžními hodinami. Uvnitř má kostel plochý dřevěný strop.

Před plánovanými opravami kostela byl měřicí systém nasazen k monitorování pohybů trhlin ve zdivu, doplněný o měření teploty. Byly použity potenciometrické snímače MMR10 a teploměry DALAS DS18B20. Celkem jsou monitorovány 4 posuny v trhlinách, 1 posun přes kompaktní zdivo (teplotní kompenzace) a 3 teploty. V tomto případě byly použity již výhradně zařízení na bázi Wemos TTGO ESP32/LoRa board 3.7.

Bylo nainstalováno jedno měřicí zařízení na kůru a jedno zařízení v sakristii. Z důvodu dosahu signálu na obě tyto měřicí ústředny bylo zvoleno umístění WiFi/GSM modemu v prostoru pod kazatelnou. Na těchto místech byly k dispozici i zásuvky pro dlouhodobé napájení bez údržby akumulátorů. Systém je provozován bez vnějších antén pro větší zisk signálu. Instalace proběhla dne 2. 11. 2018. Ukázka měřicího systému při monitorování kostela Sv. Martina ve Zlaté Olešnici je zobrazena na následujících fotografiích.





**Obrázek 3.8:** Senzor pro měření pohybu

Měřicí zařízení umístěné na kůru, kde měří 4 posuny a 1 teplotu.



**Obrázek 3.9:** Měřicí zařízení umístěné na kůru

*Text s obrázky byly převzaty z původního dokumentu: DG16P02M050-3\_SYSTEM MĚŘICÍCH ÚSTŘEDEN.*

## 3.7 Shrnutí

Nejzajímavější řešení jsou určitě Dataloggery DATATAKER, výrobce na svých stránkách uvádí všechny informace ve srozumitelné řeči. V datasheetu jsou uvedeny přehledně hlavní rysy produktu. Dále výrobce dodává software pro nastavení jednotky, zobrazení dat a nabízí i možnost monitorování pomocí cloudového řešení dataTaker Live.

Řešení Rissfox Mini je starším řešením, jelikož dodávaný software je podporován od verze OS Microsoft Windows 98 až do Windows Vista. Pravděpodobně bude fungovat i na novějších OS. Výrobce prodává na trhu více variant, avšak mě osobně by ke koupi produktů nepřesvědčil.

Data loggery od firmy Picotech vypadají velice slušně, jediný nedostatek vidím v chybějící bezdrátové verzi.

Systémy TC-200 a CK-102 jsem uvedl pro ukázkou i jiných možných způsobů měření trhlin.

## Kapitola 4

### Senzory

Pro bližší seznámení s principy senzorů, které využívám ve své práci, nejprve stručně uvedu základní rozdělení a důležité parametry. Poté popíši jednotlivé typy senzorů polohy, tenzometrů a teploty. Na konec kapitoly o senzorech uvedu užitečné shrnutí, které vystihuje vše podstatné.

Vhodnou definicí senzoru může být následující věta: *senzor je zařízení, které na obdržený podnět na vstupu reaguje elektrickým signálem na výstupu* [15]. Pod pojmem senzor tedy můžeme chápat jakékoliv zařízení, které přeměňuje vstupní podmínky na výstupní signál. Tento signál může být dále zpracován a analyzován. Senzory tedy fungují jako převodníky neelektrických veličin.

#### 4.1 Rozdělení

Senzory lze dělit do kategorií různými způsoby, proto pro zjednodušení základního rozdělení senzorů použiji popis historického vývoje, který je rozdělen do tří generací. [14]

- **První generace** – využívá základních fyzikálních jevů, jako jsou změny odporu, kapacity nebo indukčnosti, způsobené vnějšími podmínkami. Tyto senzory nejsou typicky odolné proti rušení a jejich fungování je často silně ovlivněno teplotou. Výstup těchto senzorů je analogový, měří se tedy napětí, proud, případně u kapacitních a indukčních senzorů měříme frekvenci oscilátoru, ke kterému je senzor zapojen. Do této generace řadím také senzory využívající termoelektrický a piezoelektrický jev. Typické schéma zapojení senzorů první generace se skládá ze samotného senzoru, zesilovače, AD převodníku a procesoru.
- **Druhá generace** – aktivně využívá vlastností polovodičů a integrované elektroniky na čipu. Mají výrazně lepší parametry, například díky integrované teplotní kompenzaci, integrovanému ADC doplněnému o operační zesilovač a filtr, kalibrační paměť, procesor či ASIC. Výstup těchto senzorů může být realizován i pomocí digitálního rozhraní, například I<sup>2</sup>C, SPI, 1-Wire či I<sup>2</sup>S. Do této generace tedy spadají i MEMS. Senzory druhé generace většinou můžeme nalézt již integrované v hotovém zařízení, nebo v těsné blízkosti od MCU.



- **dostatečnou rychlost vzorkování** – která musí splnit Nyquistův–Shannonův vzorkovací teorém. Pro účely práce je požadováno rozlišení, které bude odpovídat charakteru měřených dat. Pokud dojde v měřených datech ke změně jednou za větší časový interval, je rychlé vzorkování k ničemu;
- **dostatečné rozlišení převodníku** – které chceme co největší, aby se zachoval malý kvantizační krok a malá kvantizační chyba.

Po diskretizaci se data dají zpracovat a vyhodnotit digitálně. Ke zpracování lze použít například filtraci, prahování a Fourierovu transformaci. Po vyhodnocení diskrétního signálu se dají řídit akční členy či jen monitorovat měřenou oblast přes nějaké rozhraní. [14]

## 4.4 Senzory polohy

Senzory polohy se v dnešní době hojně využívají v průmyslu, například v automatizačních procesech, kdy je při manipulačním pohybu potřeba znát polohu komponentů. Obecně je můžeme najít všude tam, kde dochází, či naopak nemá docházet k pohybu, který chceme vyhodnocovat.

Dělit je můžeme například podle tvaru dráhy na lineární a úhlové, dle typu výstupu na analogové a digitální, dle způsobu měření na kontaktní a bezkontaktní. Dále je můžeme dělit podle fyzikálních principů na:

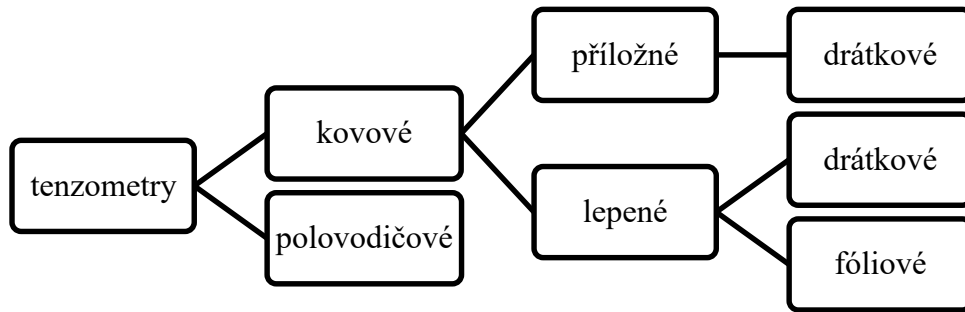
- **odporové** – využívají ke snímání změnu polohy jezdce na odporové dráze. Změna může být lineární nebo skoková. Důležité parametry jsou zejména rozlišovací schopnost a životnost. Konstrukčně je lze rozdělit podle dráhy jezdce na lineární, kruhové, šroubovicové a speciální;
- **indukční** – vyhodnocují polohu na základě změny indukčnosti cívky. Řadí se do kategorie pasivních bezdotykových senzorů a reagují pouze na kovové předměty. Magnetický obvod senzorů může být otevřený nebo uzavřený a uspořádání jednoduché nebo diferenciální;
- **magnetické** – využívají nejčastěji magnetického pole trvalého magnetu. Permanentní magnet bývá nejčastěji součástí senzoru, ale může být připevněn i na měřeném objektu. Nejznámější z této skupiny jsou senzory využívající Hallova jevu;
- **kapacitní** – vyhodnocují polohu na základě změny kapacity v okolí snímače, nebo změny kapacity měřicího kondenzátoru. Vyrábí se v dotykovém a bezdotykovém provedení. U dotykových neboli kontaktních senzorů je měřený objekt spojen s elektrodou, která je součástí senzoru. Bezdotykové neboli bezkontaktní provedení detekují přítomnost objektů díky deformaci elektrického pole;
- **optické** – využívají prakticky všechny druhy záření. Přesněji se nazývají fotoelektrické či optoelektrické senzory. Jsou založené na principech jako jsou změna polohy světelné stopy, zastínění (optická závora), odrazu,



mají vyšší citlivost, oproti tomu fóliové mají větší linearitu a přesnost. Pro aplikace, kde je nutné měřit se zvýšenou přesností, se využívají převážně tenzometry fóliové.[19] Důležitým parametrem tenzoru je směrová citlivost.

#### 4.5.1 Rozdělení

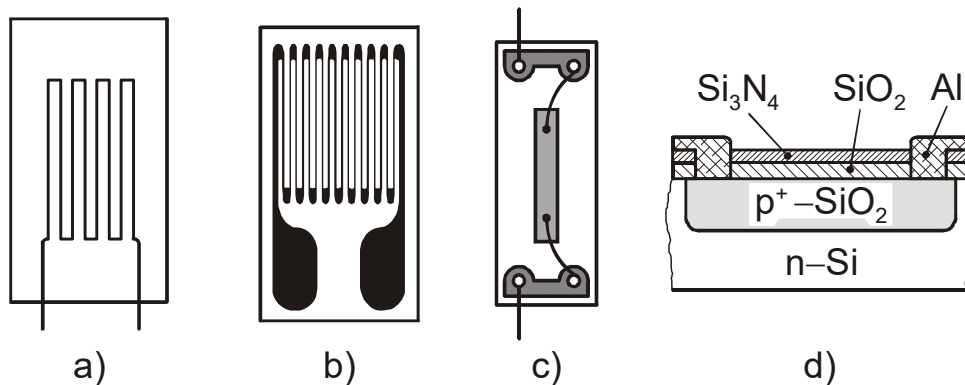
Tenzometry můžeme rozdělit podle materiálu, měřící mřížky, konstrukce a způsobu provedení mřížky 4.1.



Obrázek 4.1: Rozdělení tenzometrů [20]

Příklad tenzometrických senzorů:

- a) Drátkový tenzometr s volnou mřížkou
- b) Lepené fóliové – nejpoužívanější kovové tenzometry
- c) Naprašované kovové vrstevné
- d) Monokrystalické difúzní – polovodičové



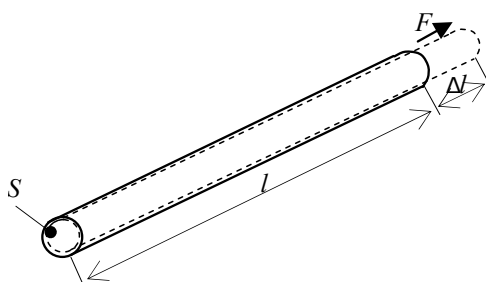
Obrázek 4.2: Příklady tenzometrů [18]

Kovový tenzometr je nejpoužívanějším druhem tenzometru. Měří mechanické napětí a slouží k měření sil, případně prodloužení nebo zkrácení délky nějaké součásti. Využívá změny elektrického odporu vodiče při jeho mechanickém namáhání. Při namáhání vodiče v tahu dojde k jeho natažení o určitou

délku a zároveň se mírně zmenší průřez a to způsobí změnu odporu. Poměrná změna odporu je u odporových tenzometrů přímo úměrná relativnímu prodloužení. Pro odvození uvedeného vztahu 4.1 je potřeba znát Hookův zákon pružné deformace, Poissonovo číslo a Youngův modul pružnosti.

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \frac{\Delta l}{l} = k \cdot \varepsilon \quad (4.1)$$

Kde  $k$  je charakteristický koeficient tenzometru,  $\varepsilon$  je relativní prodloužení vodiče.



**Obrázek 4.3:** Změna odporu vodiče při natažení

K-faktor je závislý na použitém materiálu, který určuje jeho velikost a jeho hodnota je v řádu jednotek až stovek. Obecně lze říci, že čím vyšší je hodnota k-faktoru, tím lepší je citlivost snímače.[20]

Využití tenzometrů můžeme najít u senzorů síly, elektronických vah, membránových tlakoměrů a monitorování deformací.

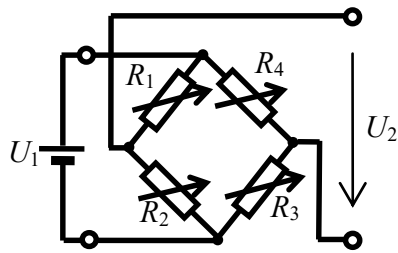
Měření se stoprocentní přesností je prakticky nemožné. Parazitní jevy negativně ovlivňují přesnost měření a způsobují chybu, kterou je třeba minimalizovat. Měření je ovlivněno zejména teplotou, vlhkostí, hysterezí, příčnou citlivostí, nelineární závislostí změny odporu na přetvoření, creepem, vlnovou délkou signálu a únavovým porušením.[20]

#### ■ 4.5.2 Měření

Tenzometr se dá měřit i pomocí napěťového děliče, ale to se v praxi využívá minimálně. V tak jednoduchém zapojení nelze potlačit parazitní vlivy a vyhodnocování by muselo probíhat alespoň čtyř-svorkovým měřením. Změna odporu tenzometrů je velmi malá a běžným ohmmetrem neměřitelná, k jejímu vyhodnocení se proto nejčastěji používá můstkového zapojení.

V můstkovém zapojení nevyhodnocujeme celkovou (absolutní) hodnotu odporu, ale pouze její změnu. Existuje několik zapojení můstku, nejjednodušší a nejčastější je Wheatstonův můstek 4.4.





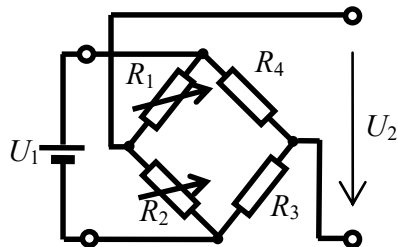
**Obrázek 4.4:** Základní zapojení Wheatstonova můstku

Pokud budou všechny odpory stejně velké a všechny se budou měnit řádově do 1 %, pak bude pro výstupní napětí  $U_2$  můstku platit:

$$U_2 = \frac{U_1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (4.2)$$

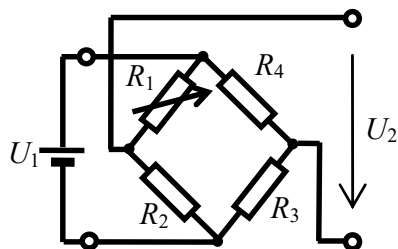
Největší citlivosti můstkového zapojení lze dosáhnout tak, aby se všechny odpory v můstku měnily působením měřené veličiny, a to tak, aby se  $R_1$  a  $R_3$  měnily jedním směrem a  $R_2$  spolu s  $R_4$  druhým směrem. Pokud tohoto stavu lze dosáhnout, označujeme zapojení jako plné 4.4. Jedná se o ideální stav, který bohužel nelze aplikovat vždy.

Dále můžeme mít můstek poloviční 4.5, u kterého jsou ovlivňovány měřenou veličinou pouze dva odpory. Výhoda zapojení spočívá především v kompenzaci parazitní námahy.



**Obrázek 4.5:** Poloviční Wheatstoneův můstek

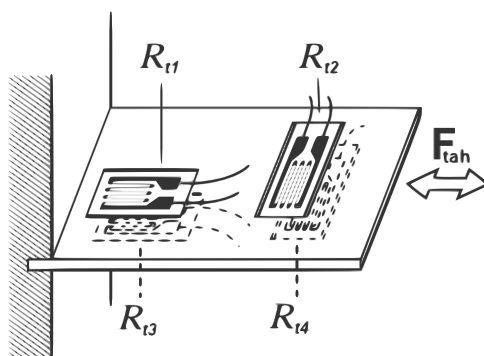
V nejjednodušším případě můžeme mít čtvrtinový můstek 4.6, u kterého je ovlivňován měřenou veličinou pouze jeden odpor. Výhodou takového zapojení je nízká cena. Nekompenzuje parazitní námahu ani teplotní vliv okolí.



**Obrázek 4.6:** Čtvrtinový Wheatstoneův můstek

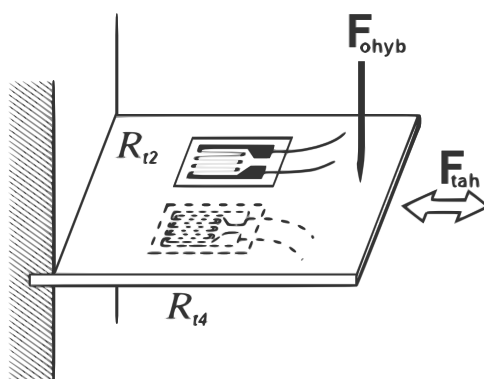
### 4.5.3 Aplikace

**Plný Wheatstonův můstek** disponuje nejvíce výhodami na úkor použití velkého množství tenzometrů. Kompenzuje teplotní vlivy a parazitní namáhání.



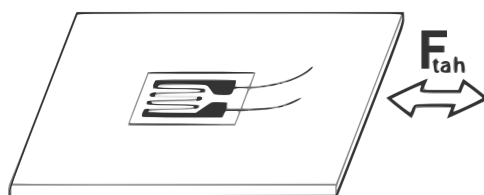
Obrázek 4.7: Aplikace plného můstku [21]

**Poloviční Wheatstonův můstek** kompenzuje parazitní námahy. Při ohybu tyče se odpor jednoho z tenzometrů zvyšuje a druhého snižuje. Díky můstkovému zapojení se tyto rozdíly navzájem anulují. Pokud je na tyč vyvíjena síla v podélném směru, signály z tenzometrů se naopak sčítají a měření je tedy dvakrát citlivější.



Obrázek 4.8: Aplikace polovičního můstku [21]

**Čtvrtinový Wheatstonův můstek** nekompenzuje parazitní námahu ani teplotní vliv okolí.



Obrázek 4.9: Aplikace čtvrtinového můstku [21]

## 4.6 Měření teploty

Čidlo zaznamená změnu teploty tím, že se změní vlastnosti materiálu samotného čidla dle použitého principu měření. [18]

Dělit je můžeme na:

- **kontaktní**
  - **elektrické**
  - **dilatační** – založené na teplotní roztažnosti pevných látek, kapalin a plynů;
  - **speciální** – například šumové a akustické;
- **bezkontaktní** – teplota se měří na základě vyzařování tepelného nebo světelného záření. Uplatňují se zákony jako je Planckův vyzařovací zákon, Wienův zákon a Stefanův-Bolcmanův zákon. Senzory pro bezkontaktní měření se nazývají pyrometry.

Původně se uplatňovaly v takových provozech a aplikacích, kde bylo třeba měřit vysoké teploty (obvykle nad 500 °C) a nebylo možno použít dotykový teploměr. Přenosné bezdotykové teploměry nacházejí široké uplatnění při detekci tepelných ztrát a poruch, při kontrole potrubních systémů, nádrží apod. K měření rozložení teploty na povrchu objektů a k diagnostickým účelům se stále častěji využívají termokamery, které patří k nejmodernější termodiagnostické technice. Záření je optickým systémem soustředěno na vhodný detektor, jehož elektrický signál je dále zpracován v elektronických obvodech a výstupem je pak údaj na displeji nebo termogram na monitoru vyhodnocovacího zařízení. [29]

### 4.6.1 Elektrické senzory teploty

Elektrické senzory teploty můžeme dále rozdělit na:

- **odporové kovové (RTD)** – principem je teplotní závislost elektrického odporu kovů na teplotě. Mají určité omezení a dají se použít jen pro určitý rozsah. Typicky 0 °C až 100 °C. Nejpoužívanější materiály jsou platina, nikl a měď;
- **odporové polovodičové** – do této skupiny patří termistory NTC, PTC a monokrystalické Si. Monokrystalické snímače pracují na principu závislosti vlastního polovodiče na teplotě, nebo závislosti teploty na úbytku napětí PN přechodu. Termistory pracují na principu změny odporu se změnou teploty u kovových oxidů. Mají velkou přesnost a citlivost při měření v rozsahu -30 °C až +60 °C. Termistory se dělí podle teplotního koeficientu na negastory (NTC) a pozistory (PTC);
- **termoelektrické** – patří mezi nejpoužívanější senzory teploty v průmyslu. Fungují v širokém rozsahu teplot. Jsou velmi robustní, spolehlivé

a při vhodné konstrukci mohou být i velmi rychlé. V praxi je velmi běžný typ K. Využívají termoelektrického jevu, který se nazývá Seebeckův jev. Základem je termoelektrický článek, který je vytvořen dvěma vodiči nebo tyčemi z odlišných materiálů. V případě, že dojde ke spojení dvou vodičů z různých kovů, v uzavřeném obvodu začne protékat elektrický proud a vznikne termoelektrické napětí. [22]

Přes rostoucí význam bezkontaktního měření teploty na bázi infračerveného záření se teplota měří v průmyslu nejčastěji kontaktními metodami. Teplotní čidlo je zde v přímém kontaktu s měřeným povrchem.

## 4.7 Shrnutí

V dnešní době jsou senzory nedílnou součástí průmyslového prostředí i běžného života.

V průmyslu jsou vysoké nároky na odolnost a životnost, proto se uplatní především ty nejprimitivnější, nejspolehlivější a snadno servisovatelné senzory. Samozřejmě se uplatní i daleko komplexnější senzory, které jsou nutné pro vyhodnocení kritických oblastí, kde je potřeba vysokých nároků na parametry. Setkat se můžeme i se systémy, které mají v sobě již zaintegrovány širokou škálu senzorů a využívají pro komunikaci fyzické či bezdrátové spojení.

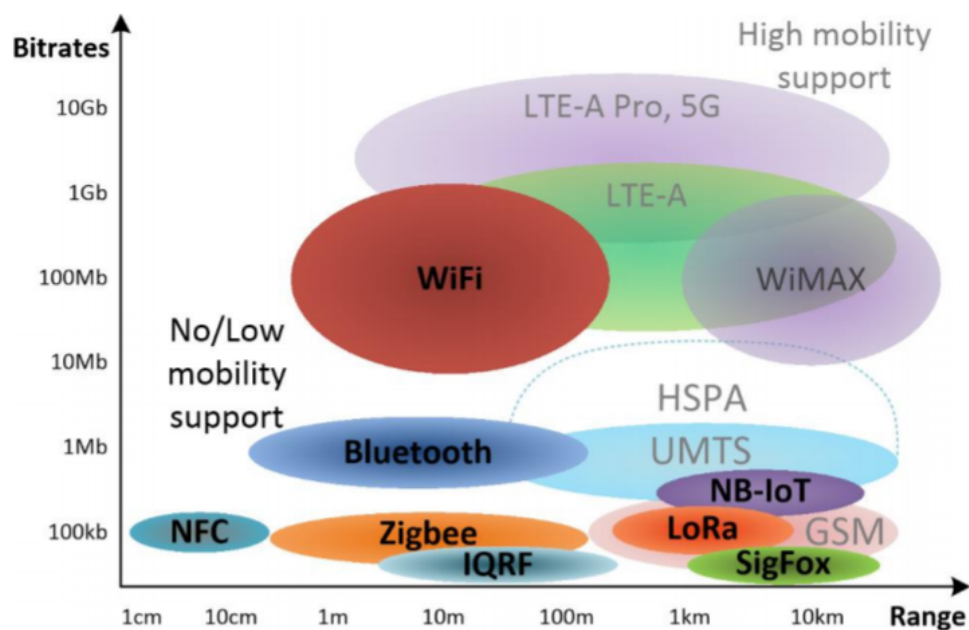
V běžném životě narazíme na senzory téměř všude. Od těch nejjednodušších až po ty modernější, například v mobilních telefonech, chytrých hodinkách, tabletech a jiné spotřební elektronice, kde jsou integrovány různé typy MEMS, které obsahují co nejvíce senzorů z důvodů vyššího prodejního potenciálu.

Pro nejvhodnější použití senzoru je nutné zohlednit řadu kritérií. Důležité jsou jednoznačně parametry senzorů, které budou ovlivňovat výsledky měření, dostatečný výpočetní výkon pro převod a zpracování, a princip senzoru. Obecně se nedá říct, jaký typ senzoru je nejlepší, vždy se jedná o nějaký kompromis.

## Kapitola 5

### Bezdrátové komunikační technologie

V této kapitole stručně porovnám dostupné bezdrátové technologie a na konec kapitoly uvedu tabulku, který porovnává základní parametry. Největší výhodou bezdrátových technologií je snadná instalace, kde se nemusí využít metalických vedení pro propojení jednotlivých zařízení. Největší nevýhodou je pak nutnost šifrování a zabezpečení dostatečného pokrytí signálem. Pokud je zařízení napájeno z baterie, je třeba řešit spotřebu bezdrátového modulu. Na obr.č. 5.1 jsou porovnány základní vlastnosti bezdrátových technologií, jako je datová propustnost a dosah.



Obrázek 5.1: Srovnání bezdrátových technologií [23]

#### 5.1 Wi-Fi

Technologie Wi-Fi (Wireless Fidelity) je zástupce bezdrátové komunikační technologie vytvářející síť typu WLAN. Tento typ připojení dovoluje vysokou přenosovou rychlost ve srovnání s uvedenými technologiemi v kapitole. Wi-Fi



v bezlicenčních ISM (Industrial, Scientific and Medical) pásmech 433 MHz, 866 MHz nebo 916 MHz.

Významnou vlastností IQRF modulů jsou velmi kompaktní rozměry dosahující velikosti klasické SIM karty a obdobně jako ZigBee využívá topologie MESH. [24]

## 5.5 LoRa

LoRa je zkratka vzniklá z anglických slov „long range radio“, tedy rádio s dlouhým dosahem. Jedná se o bezdrátový standard, který definuje specifický způsob modulace signálu v rozprostřeném spektru. LoRa® je patentovaná značka firmy Semtech, která licencuje svou technologii výrobcům integrovaných obvodů a sama je také vyrábí. LoRa je vhodná pro bateriově napájená zařízení díky nízké energetické náročnosti. Dosah může být až 48 km, ale bylo dosaženo i mnohem větších vzdáleností v řádu stovek kilometrů[27]. Zajišťuje jednosměrný i obousměrný provoz.

LoRa má rychlost datového přenosu od 0,3 kbit/s do 50 kbit/s. Pracuje na různých frekvencích po celém světě, přičemž jsou volena bez-licenční pásma 868 MHz pro Evropu, 902 MHz pro Severní Ameriku a 433 MHz pro Asii. Varianty možných šířek pásma jsou 7,8 kHz, 10,4 kHz, 15,6 kHz, 20,8 kHz, 31,2 kHz, 41,7 kHz, 62,5 kHz, 125 kHz, 250 kHz a 500 kHz. To dává možnost volby velikosti šířky pásma podle požadavků daného přenosového spoje. Nejčastěji jsou využívány šířky pásma 125 kHz či 250 kHz. Přenos dat využívá modulaci Chirp rozprostřené spektrum. Tato modulace se používá již delší dobu v armádě a vesmírném výzkumu. Modulace je velmi odolná vůči rušení. Přijímač je schopný zpracovat i signály s výkonem pod hladinou šumu. [27] [28]

## 5.6 Sigfox

Sigfox používá pro umožnění velkého dosahu sítě na fyzické vrstvě (PHY) techniku ultra narrow band (UNB), čímž se významně odlišuje od systému LoRa, který je postaven na direct DSSS systému (sequence spread spektrum). Důležitá výhoda při používání UNB je velká flexibilita z nabídek designů antén, jež lze dimenzovat přímo na míru pro danou situaci. Síť je sestavena do topologie hvězdy, čímž velmi snižuje své náklady na stavbu i energetickou spotřebu celé sítě.

Síť pracuje v celosvětově volných bezlicenčních pásmech a je dimenzována pro komunikaci malými zprávami o velikosti datového obsahu (payload) maximálně 12 B. Takovýchto zpráv je možné posílat z jednoho zařízení maximálně 140 za den a 6 za hodinu. K tomu je uzpůsobena také propustnost do 100 bit/s. Ve zpětném směru je propustnost 500 bit/s a limit 4 zprávy za den.

Jedna základnová stanice Sigfoxu má dosah v rozmezí od 30 do 50 km mimo město a ve městech kvůli přítomnému vyššímu šumu a velkému množství

překážek od 3 do 10 km. Vzdálenost může být ještě větší, a to v až 1 000 km u venkovního access pointu. Z toho se následně odvíjí hustota rozmístění základnových stanic. [28]

	Wi-Fi	BLE	ZigBee	IQRF	LORA	SigFox
<b>Dosah</b>	100 m	300 m typicky 50 m	100 m	500 m	15 - 20 km	30 - 50 km 3 - 10 km
<b>Propustnost</b>	1000 Mbit/s	1 Mbit/s typicky 100 kbit/s	100 – 250 kbps	1,2 - 115 kbit/s typicky 19,836 kbit/s	0,25 - 50 kbit/s	100 bit/s
<b>Topologie</b>	-	SCATTERNET	MESH	MESH	STAR	STAR
<b>Frekvenční pásma</b>	2,4 GHz až 60 GHz	2,4 GHz	868 MHz 2,4 GHz	868 MHz (Evropa) 915 MHz (S. Amerika) 433 MHz (Asie)	868 MHz (Evropa) 915 MHz (S. Amerika) 433 MHz (Asie)	868 MHz (Evropa) 915 MHz (USA)
<b>Maximální Payload</b>	-	244 B	104 B	64 B	255 B	12 B
<b>Spotřeba</b>	116 mA	Tx 15 mA	Rx 18,5 mA Tx cca 30 mA	Rx: 12.3 mA LP Rx: 170 µA Extra LP Rx: 25 µA Sleep: 2 µA	Desítky µA	Tx 5-45 mA standby režim cca 15 µA

**Tabulka 5.1:** Porovnání technických parametrů technologií

Uvedené parametry jsou spíše orientační, pro praktické použití je třeba vzít v úvahu řadu vnějších vlivů, které ovlivňují podmínky šíření a tím zejména dosah a propustnost sítě.



## Kapitola 6

### Návrh vlastního řešení

V této kapitole se zaměřím na finální verzi řešení a hlavní požadavky, které jsem musel zohlednit. V průběhu kapitoly uvedu obecné blokové schéma a postupně rozeberu jednotlivé použité prvky. V textu popíšu postup návrhu od specifikací požadavků, přes návrh první verze až po dvě zásadní úpravy, které vedly k aktuální verzi.

Navrhované řešení má za cíl sestavit bezdrátový systému sběru dat, který bude především energeticky nenáročný, přenosný a uživatelsky přívětivý. Největšími nevýhodami u dostupných komerčních řešení jsou velké a těžké akumulátory, možnost připojení buď přes RS232 rozhraní nebo GSM síť. Výsledné řešení by mělo být finančně dostupnější než průmyslové měřicí ústředny a mělo by usnadnit práci při dlouhodobém monitorování konstrukcí. Pro sdílení dat bude výsledné řešení využívat bezdrátové technologie IQRF, ale bude moct ukládat měřená data i lokálně na paměťové médium. V řešení bude integrován senzor teploty, vlhkosti a atmosférického tlaku. Uživateli bude umožněno lokální nastavení jednotky bez nutnosti programování.

Největší výhodou ve vztahu k památkovým objektům je minimalizace drátové infrastruktury a tím minimalizace zásahu do konstrukce památkového objektu, který je monitorován.

#### 6.1 Požadavky

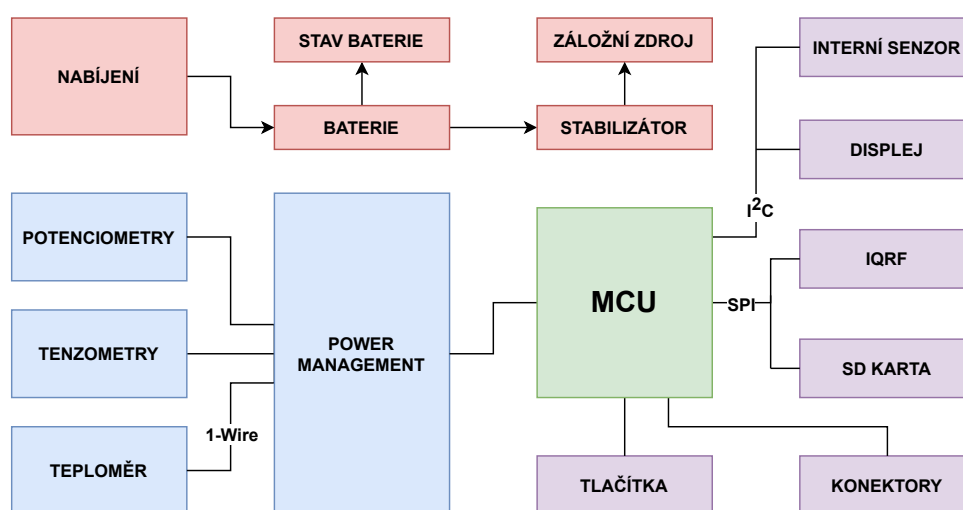
Po analýze původního řešení jsou hlavní nároky zaměřeny na:

- **bezdrátové technologie** – které budou poskytovat naměřená data hlavní jednotce a zároveň umožní nastavení,
- **dlouhá výdrž baterie** – v řádech jednotek měsíců,
- **kompaktní rozměry** – bez potřeby rozměrných akumulátorů a velkých boxů,
- **měření základních veličin** – pomocí potenciometrických snímačů, digitálních teploměrů a případně fóliových tenzometrů.

## 6.2 Blokové schéma

Velký důraz byl kladen na použití low leakage součástek (v podstatě se jedná o součástky, které mají nízký svodový proud) a dostupných prvků na trhu. Zjednodušené blokové schéma je uvedeno na obr.č. 6.1. Schéma je pro přehlednost barevně rozlišeno – červeně je označena napájecí část, modře část senzorů a power managementu, fialově všechny ostatní komponenty a zeleně samotný mikrokontrolér.

V dalších podkapitolách rozeberu jednotlivé bloky, uvedu proč jsem je zvolil a popíšu jejich činnost.

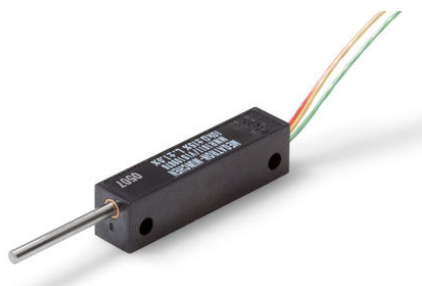


Obrázek 6.1: Blokové schéma finální verze

## 6.3 Použité senzory

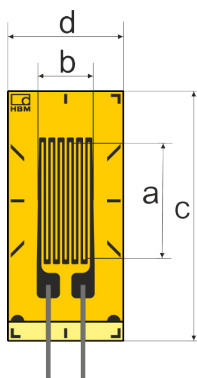
Zařízení bude obsahovat svorkovnice pro připojení dvou potenciometrických snímačů, dvou tenzometrů a jednoho digitálního teploměru. Uvedu zde senzory, které KÚ nejčastěji využívá a také kombinovaný digitální senzor BME280 od firmy Bosch, který je osazený přímo na DPS.

- **Potenciometrický snímač** – miniaturní snímač polohy MM10/MMR10 v pouzdře z Duroplastu s měřícím rozsahem od 8 do 15 mm. Životnost (pohyby hřídele) 40/20 mil., Tolerance linearity  $\pm 2\%$ , Rozlišení  $< 0,01$  mm [30].



**Obrázek 6.2:** Lineární potenciometrický snímač MM10 [30]

- **Tenzometr** – HBM 1-LY11-10/120 lineární tenzometry s jednou měřicí mřížkou. Pro měření napětí pouze v jednom směru. Tenzometry lze koupit v rozdílných jmenovitých hodnotách odporů od  $120 \Omega$  do  $1000 \Omega$ . V praxi se většinou využívá tenzometr s hodnotou  $120 \Omega$ . Rozměry mřížky:  $a = 10 \text{ mm}$ ,  $b = 4,9 \text{ mm}$ ,  $c = 18,5 \text{ mm}$ . Maximální budící napětí můstku je  $13 \text{ V}$ . Měřicí mřížka se skládá z konstantanu a materiál nosiče mřížky z polyimidu [31].



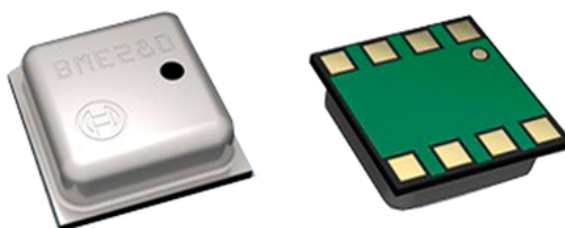
**Obrázek 6.3:** Lineární tenzometr s 1 měřicí mřížkou [31]

- **Teploměr** – DALAS DS18B20. Jedná se o digitální teploměr od firmy Maxim, dříve Dallas. Za relativně nízkou cenu umožňuje měřit teplotu v rozsahu  $-55 \text{ }^\circ\text{C}$  až  $+125 \text{ }^\circ\text{C}$ , přičemž v rozsahu  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  až  $+85 \text{ }^\circ\text{C}$  má garantovanou přesnost  $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pro komunikaci využívá sběrnici 1-Wire.



**Obrázek 6.4:** Sonda s teplotním čidlem DS18B20 [32]

- **BME280** – jedná se o kombinovaný digitální senzor pro měření teploty, vlhkosti a barometrického tlaku v pouzdře LGA8. Je určený pro bateriově napájené zařízení a vyznačuje se nízkou spotřebou. Spotřeba proudu se pohybuje při měření v jednotkách  $\mu\text{A}$ . Senzor může pracovat ve třech různých módech, které se liší především spotřebou. Rozsah napájecího napětí je od 1,71 V do 3,6 V. Rozsah teploty je od  $-40\text{ }^\circ\text{C}$  do  $85\text{ }^\circ\text{C}$ , rozsah vlhkosti 0 až 100 % a rozsah barometrického tlaku 300 až 1 100 hPa. Pro komunikaci lze využít sběrnice I<sup>2</sup>C nebo SPI. Volba se provádí pomocí definované logické úrovně na pinu CSB.



**Obrázek 6.5:** Senzor BME280 v pouzdře LGA8 [32]

## 6.4 Mikrokontrolér

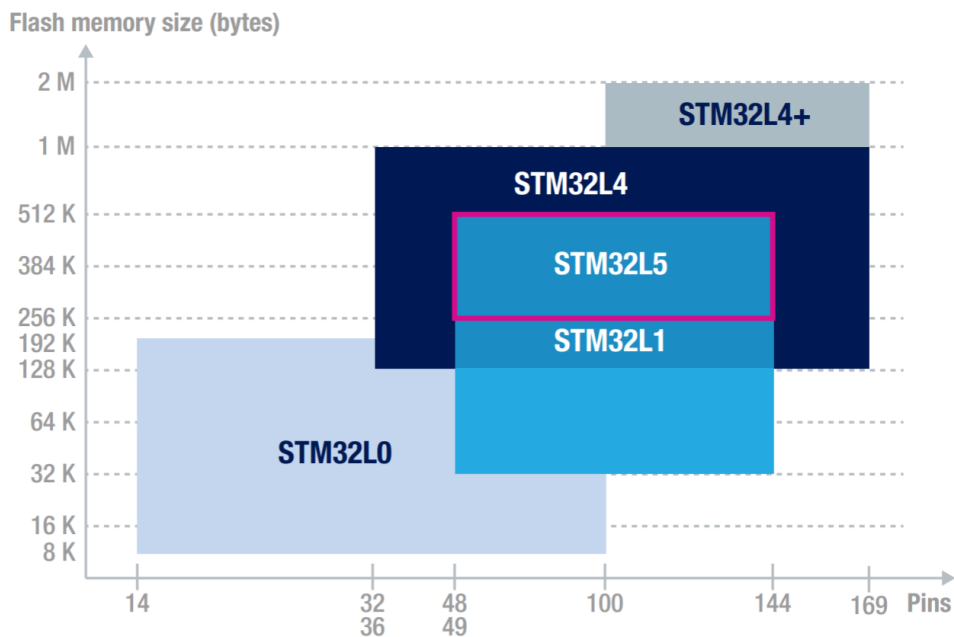
Mikrokontrolér, neboli MCU, je realizován na samostatném čipu. Obsahuje mikroprocesor, vstupní a výstupní obvody, řídicí jednotku, paměti EEPROM, RAM a FLASH. Nejznámější a nejpoužívanější typy MCU jsou AVR od firmy Atmel, kterou koupil Microchip, PIC od firmy Microchip a ARM od firmy ST.

V mé práci jsem se rozhodl pro MCU od firmy ST, jelikož jsem se s nimi mohl seznámit během studia a zároveň jsem si chtěl vyzkoušet praktické použití. V požadavcích na řešení se musí jednoznačně řešit nízká spotřeba, proto jsem vybíral vhodný MCU z řady L.

Tato řada má vhodné parametry pro použití do bateriově napájených zařízení a může dosahovat i dostatečného výpočetního výkonu. Řada L nabízí relativně velké množství mikrokontrolérů, proto jsem jako první zohlednil pořizovací cenu, dostatečný výpočetní výkon a dostatečnou velikost Flash paměti. Na obr.č. 6.7 je znázorněn základní přehled řady L.



**Obrázek 6.6:** STM32L v pouzdře LQFP48



Obrázek 6.7: Přehled STM32 řady L

Byla vybrána řada L0, která je zcela dostačující pro mé potřeby. Řada STM32L0 je velice úsporným řešením pro základní aplikace, je postavena na jádře Cortex-M0/M0+ a velikost flash paměti se pohybuje až do 192 kB. Cortex-M0 tvoří základ pro čipy, u nichž je žádoucí dosáhnout co nejnižší výrobní ceny, malých rozměrů a malého příkonu.

Jako hlavní řídicí člen byl vybrán low-power **STM32L072CBT6**, 32bitový ARM v pouzdře LQFP48. Byl vybrán především kvůli velikost flash paměti, která bude rozhodně potřeba při použití HAL knihoven. Uvedu zde základní parametry vybraného MCU, které jsou z hlediska návrhu nejzajímavější:

- velikost programovatelné paměti – 128 kB,
- velikost paměti RAM – 20 kB,
- počet pinů – 48,
- podporované rozhraní – I<sup>2</sup>C, I<sup>2</sup>S, SPI, UART, USART, USB,
- pracovní napětí – od 1,8 V do 3,6 V,
- rozlišení ADC – 12bitový,
- spotřeba – až 98 μA/MHz, kdy při různých použitých módech je spotřeba v řádu jednotek μA.

Dále nabízí například dva DAC, dva komparátory, několik časovačů s jedním low power označeným jako LPTIM, RTC, SysTick a dva watchdogy.

MCU bude naprogramován pomocí dostupného vývojového prostředí Atollic TrueSTUDIO for STM32 9.3.0., který je zdarma ke stažení. K nahrání

programu využijí USB programátor ST-Link V2. Režim programování bude normální, tzn. využijí rozhraní SWD, které potřebuje pouze čtyři vodiče. Napájení, GND, SWD\_IO a SWD\_CLK.

### ■ 6.4.1 Low power mody

Oproti běžným řadám F umí řada L odpojovat periférie nebo je používat úspornějším způsobem, pracovat na nižších frekvencích a pracovat s nižším napájecím napětím. Mikrokontroler může pracovat v celkem pěti různých low power módech.

- **Sleep mode** – nabízí nejkratší dobu probuzení (*přibližně 10x rychlejší než ostatní režimy*), na úkor vyššího odběru energie. Datasheet uvádí, že se všemi deaktivovanými perifériemi a frekvencí jádra 16 MHz bude spotřeba proudu přibližně 1 mA. V tomto režimu se zastaví pouze jádro, zatímco ostatní periférie nadále běží. Není tedy potřeba řešit změnu frekvence jádra. Sleep mod se ukončí velice snadno a to za pomoci jakéhokoliv přerušení nebo události.
- **Low-power run mode** – v tomto režimu je frekvence jádra nastavena na 131 kHz pomocí interního oscilátoru MSI. V tomto módu se uvede interní napěťový regulátor do stavu nízkého výkonu a počet povolených I/O pinů je omezen.
- **Low-power sleep mode** – do tohoto módu se dá dostat za podmínek aktivace sleep módu s interním napěťovým regulátorem v režimu nízkého výkonu. Po probuzení pomocí přerušení či události se regulátor zapne a jádro se vrátí zpět do run módu.
- **Stop Mode** – pravděpodobně nejsložitější režim, který je k dispozici. Stop mód může teoreticky dosáhnout aktuální spotřeby v řádu nanoampér, přičemž se zachová paměť SRAM a obsah registrů. Všechny hodiny jsou zastaveny, všechny oscilátory pozastaveny a napěťový regulátor je ve stavu nízkého výkonu. Probuzení může být způsobeno přerušením, nebo výstupem z komparátorů, RTC alarmem, nebo událostí na USB/USART/I2C/LPUART/LPTIMER. Systém po probuzení není nutné znovu inicializovat.
- **Standby mode** – jediné periférie, které fungují jsou RTC a IWDG. Interní regulátor napětí je vypnutý a všechny I/O piny jsou nastaveny ve stavu vysoké impedance. Po vstupu do tohoto módu dojde ke ztrátě informací v paměti RAM a všech registrů, po probuzení proběhne počáteční inicializace. K probuzení může dojít pomocí externího resetu, náběžné hrany na jednom ze tří wake-up pinů nebo RTC alarmem.

Pro lepší srovnání výše uvedených módu je možné využít následující tabulku č. 6.4.1, kde pro jednoduchost 1 znamená nejlepší a 5 nejhorší výsledek.

	LP run	Sleep	LPSleep	Stop	Standby
<b>Wake-up Time</b>	2	1	4	3	5
<b>Wake-up Source</b>	1	2	3	4	5
<b>Power Consumption</b>	4	5	3	2	1
<b>Performance</b>	1	2	3	4	5

**Tabulka 6.1:** Porovnání STM32L0 low-power módů [33]

Pro aplikace s nízkou spotřebou má STM32L mnoho režimů, které uživateli umožňují do značné míry regulovat spotřebu energie. Řada STM32L0 využívá energeticky nejúčinnější procesor ARM Cortex-M0+ a poskytuje pět režimů nízké spotřeby, které vyhovují většině aplikací na základní úrovni. [34] [33]

## 6.5 Sběrnice

Jedná se o soustavu vodičů, která propojuje elektrická zařízení mezi sebou. Používají se k přenosu dat, adres, řídicích a stavových signálů. Existují různé standardy sběrnic, které se liší ve vlastnostech.

V blokovém schématu 6.1 lze vidět, že využívám celkem 3 sběrnice a to I<sup>2</sup>C, SPI a 1-Wire. Stručně zde uvedu základní vlastnosti jednotlivých použitých sběrnic.

### 6.5.1 I<sup>2</sup>C

Sběrnice I<sup>2</sup>C je používána na krátké vzdálenosti. Jde o sériovou synchronní komunikaci. Komunikace je poloduplexní, v jednu chvíli může vysílat pouze jedno zařízení. Zařízení připojená na sběrnici jsou identifikována pomocí jednoznačných adres. Každé zařízení má svou unikátní adresu nastavitelnou pomocí externích pinů. Adresa je 7 bitů dlouhá, v novějších verzích existuje i rozšířená varianta 10 bitové adresy.

I<sup>2</sup>C využívá dva vodiče, datový SDA a hodinový SCL. Před započítím komunikace jsou oba vodiče nastaveny na klidovou hodnotu, tj. log. 1. Většina aplikací vyžaduje definované logické stavy. Provedení výstupu je realizováno pouze jedním NPN tranzistorem, který je schopen pouze sepnout a tím daný výstup uzemnit. Tento způsob provedení není schopen vnutit na výstup žádné napětí, jen jej spojit se zemí. Proto je zde potřeba použít pull-up rezistor, který pokud je tranzistor otevřený, vnutí na výstup například napájecí napětí.[35] Vysoká logická úroveň je tedy zajištěna připojením pull-up rezistorů. Se zvyšujícím se počtem připojených zařízení se hodnota těchto pull-up rezistorů zmenšuje. [36]

V mé práci je sběrnice I<sup>2</sup>C využita pro propojení OLED displeje, senzoru BME280, obvodu pro sledování stavu baterie Fuel Gauge a programovatelného odporu z částí tenzometrů.

## 6.5.2 SPI

Sběrnice Serial Peripheral Interface funguje na principu komunikace Master-Slave. Využívá čtyři vodiče, kde:

- **SCLK** – je hodinový signál generovaný Masterem,
- **MOSI** – (Master out, Slave in) přenáší data od Mastera ke Slave zařízení,
- **MISO** – (Master in, Slave out) přenáší data v opačném směru,
- **CS** (chip select) či **SS** (Slave select) – pomocí kterých Master určuje, se kterým zařízením typu Slave bude komunikovat.

Maximální přenosová rychlost je dána hodinovou frekvencí synchronizačního signálu, pro 10 MHz můžeme dosáhnout až 10 Mb/s. Maximální vzdálenost komunikace je ovlivněna požadovanou přenosovou rychlostí a kapacitou vodičů, pohybuje se v řádu jednotek desítek centimetrů.[36]

V práci je sběrnice SPI použita pro propojení microSD karty a IQRF modulu.

## 6.5.3 1-Wire

Digitální sběrnice 1-Wire, navržená firmou Dallas Semiconductor, je sériová, obousměrná half-duplex sběrnice. 1-Wire umožňuje připojit několik Slave zařízení k řídicí jednotce prostřednictvím dvou vodičů, kde je potřeba zajistit dostatečně výkonný proudový výstup, nebo třech vodičů, které se skládají z Vdd, GND a datového vodiče.

Jedná se o Master-Slave komunikaci. Když neprobíhá komunikace, na sběrnici je definována logická úroveň vztažená k napájení. Čtení zahajuje master tím, že stáhne sběrnici k nule na minimálně 1  $\mu$ s a opět ji uvolní. Po tomto zahájení může zařízení vyslat 1 bit buď tím, že ponechá sběrnici v klidu (log. 1) nebo tím, že ji stáhne (log. 0). Rychlost přenosu dat je standardně 15,4 kb/s, ale může pracovat až 125 kb/s.

Každé zařízení má svoje ID od výrobce. Typ výstupu je open drain. Komunikace probíhá prostřednictvím časových slotů.[37]

V práci je sběrnice 1-Wire použita k propojení digitálního teplotního senzoru DS18B20, který je zapojený pomocí tří vodičů.

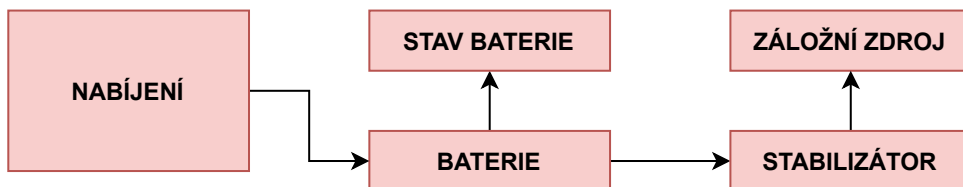
## 6.6 Napájecí část

V této podkapitole jsou popsány jednotlivé bloky z napájecí části 6.8. Z blokového schématu je vidět, že principiálně napájecí část funguje následovně:

- Jako primární zdroj energie je Li-Ionová baterie, kterou je možné nabíjet. Napětí z baterie je potřeba stabilizovat, a proto byl vybrán vhodný stabilizátor, dále jen LDO (Low-Dropout Linear Regulators).



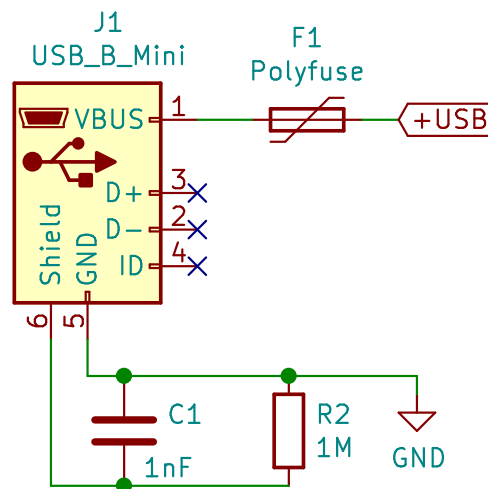
- Pokud by byla vyjmuta baterie, měl by záložní zdroj poskytnout dostatek energie pro uchování nastavení a času do doby, než se baterie vrátí zpět.
- Stav baterie sleduje příslušný integrovaný obvod, který poskytuje data MCU prostřednictvím rozhraní I<sup>2</sup>C.



Obrázek 6.8: Napájecí část

### 6.6.1 Nabíjení

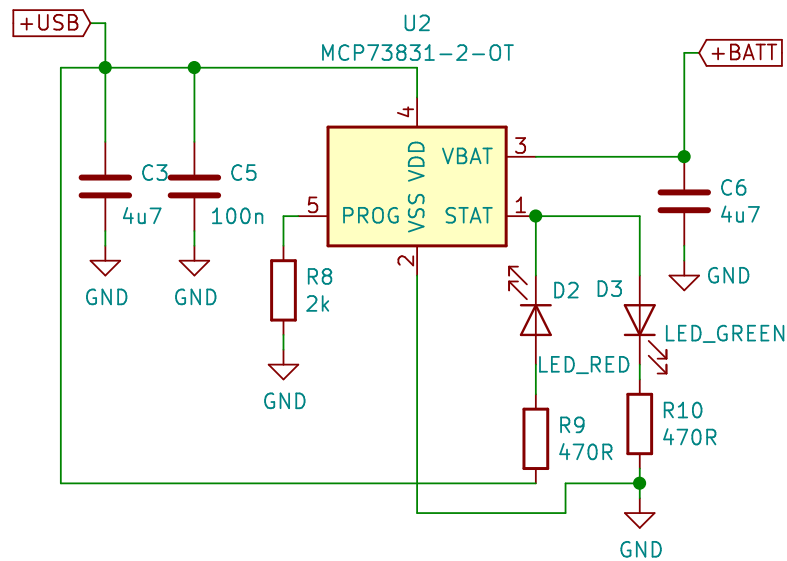
Nabíjení je realizováno pomocí MCP73831-2-OT v pouzdře SOT-23-5. Vstup +USB je složen z USB B mini konektoru, vratné pojistky F1 a základní ochrany vstupu proti vysokonapěťovým špičkám C1 a R2 v pouzdře 1206.



Obrázek 6.9: Napájecí část USB

MCP73831 je kontrolér určený pro lineární nabíjení Li-Ion a Li-Po baterií. Pomocí odporu R8 se dá nastavit nabíjecí proud, který může být maximálně 500 mA. Kontrolér se vyrábí ve variantách 4,20 V, 4,35 V, 4,40 V a 4,50 V. Dále se může lišit výstup STAT, který může být třístavový, nebo open drain.

Byl vybrán typ kontroléru s výstupním napětí 4,2 V, který má třístavový výstup STAT, díky kterému je možné jednoduché indikace stavu baterie. Prakticky to znamená, že pokud se připojí nabíječka pomocí USB B mini konektoru a baterii je potřeba nabít, svítí červená LED (LED\_RED). Pokud je baterie nabitá, červená zhasne a rozsvítí se LED zelená (LED\_GREEN).

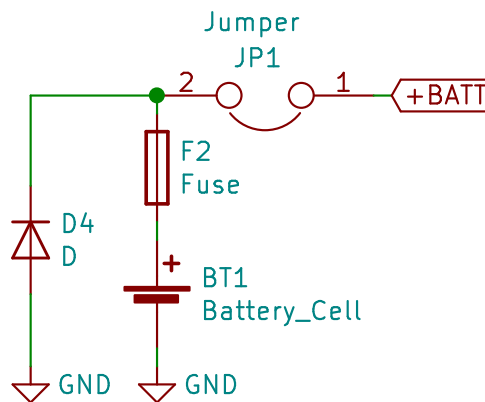


Obrázek 6.10: Napájecí část BatteryCharger

## 6.6.2 Baterie

Baterie byla vybrána Li-Ion 18650 s kapacitou 3 000 mAh. Na schématu č. 6.11 je vidět základní ochrana proti přepólování baterie v podobě pojistky F2 a diody D4. Pokud dojde k přepólování, dioda se otevře a pojistka přepálí. Pojistka F2 je zvolená jako nejdostupnější varianta 5x20 mm s maximálním proudem 500 mA.

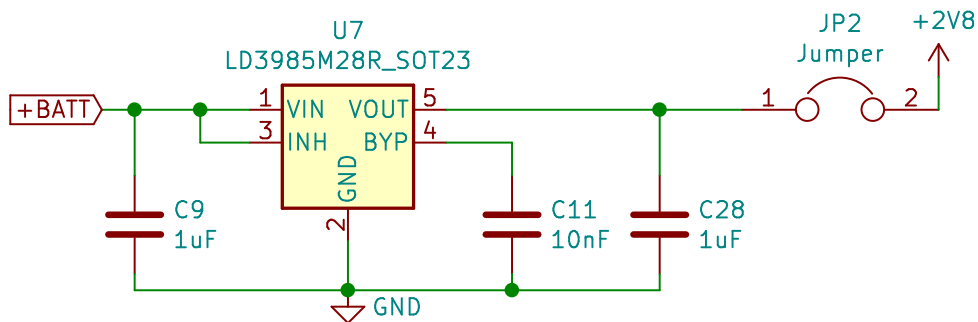
Toto řešení jsem zvolil z důvodů menšího svodového proudu (low leakage current) a podstatně menší ceně, oproti dostupným obvodům, které jsou realizovány tranzistorem v sepnutém stavu. Z měření závěrného proudu diod vyšly hodnoty, které byly až o 3 řády nižší oproti hodnotám z katalogových listů. Hledat tedy vyložení součástky s nízkým svodovým proudem (ultra low leakage current) je pravděpodobně zbytečné pro obdobné aplikace.



Obrázek 6.11: Napájecí část baterie

### 6.6.3 Stabilizátor

Jako pevný napěťový regulátor s výstupním napětím 2,8 V byl vybrán LD3985M28R od firmy ST. Důvodem výběru je malý požadovaný rozdíl mezi výstupním a vstupním napětím (ultra low-dropout voltage), což u tohoto typu typicky bývá 60 mV při výstupním proudu 150 mA. Podle odhadů bude mít jednotka spotřebu kolem 50 mA, pokud bude zapnutý OLED displej a budou připojeny všechny senzory. Maximální výstupní proud je LDO 150 mA, což podle odhadů bude i s větší rezervou stačit.



Obrázek 6.12: Napájecí část LDO

LDO je vhodný do bateriové napájených zařízení. Prodává se ve verzích s výstupním napětím od 2,5 V až do 6 V. Disponuje kontrolním pinem INH, který slouží k vypnutí a zapnutí. Pro mé použití má pin INH definovaný logický stav a je tedy stále zapnutý.

Výstupní napětí 2,8 V bylo zvoleno hlavně kvůli využití většího potenciálu baterie. Napětí Li-Ion baterie se mění přibližně v rozsahu od 2,8 V do 4,2 V, kde spodní hranice je cut off hodnota, při které má integrovaná elektronika baterie odpojit výstup, aby se baterie nezničila. Pokud se napětí Li-Ion baterie dostane pod hodnotu 2,8 V, je velmi těžké ji znovu „oživit“.

Další důvod, proč bylo zvoleno výstupní napětí 2,8 V, je záložní zdroj, který je realizován super-kondenzátorem. Super-kondenzátory v dnešní době dosahují vysokých kapacit, ale s vyšší kapacitou klesá maximální napětí super-kondenzátoru. Zvolené výstupní napětí 2,8 V byl tedy vhodný kompromis mezi dostatečně velkou kapacitou a maximálním napětím.

Při napájení z 2,8 V vznikají problémy týkající se rozdílných napěťových logických úrovní. Programátor ST-Link V2 pracuje s napětím 3,3 V, což je ve výsledku rozdíl 0,5 V mezi MCU a programátorem. Proto bylo nutné zakomponovat level shifter mezi MCU a programovací konektory.

Při použití tohoto LDO se bude účinnost měnit podle napětí baterie. V nejhorším případě pak bude při plném nabití baterie, což je přibližně 66 %. Účinnost se bude se zmenšujícím se napětím baterie zvyšovat.

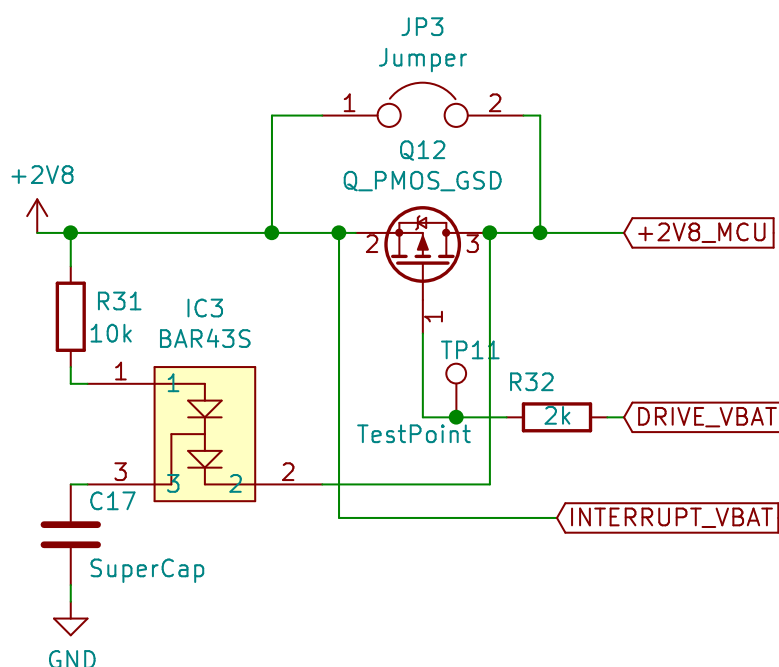
V první verzi byl vybrán step-down měnič s účinností větší než 90 % už od odběru řádově desítky  $\mu\text{A}$ , ale měl vysoké výstupní zvlnění a to ovlivňovalo měření napětí na baterii. Navíc byl měnič mnohonásobně dražší oproti LDO. Více v kapitole DPS – revize 7.1.1 .

### 6.6.4 Záložní zdroj

Dojde-li k odpojení baterie, systém obsahuje záložní zdroj energie v podobě super-kondenzátoru. Při výměně baterie poskytne super-kondenzátor dostatek energie, než se baterie vrátí. STM32L bohužel nedisponuje piny, které jsou označeny jako Vbat. Proto bylo využito následujícího schéma č. 6.13 .

V tomto zapojení má být hlavní napětí detekováno pomocí INTERRUPT\_VBAT. Pokud je detekována ztráta hlavního napětí, PMOS Q12 se uzavře pomocí DRIVE\_VBAT a tím ve výsledku poteče proud jen ze super-kondenzátoru. Pokud je detekováno hlavní napětí, PMOS Q12 se opět otevře.

Schottky diody slouží k tomu, aby nedošlo ke zpětnému proudu do hlavního napájení. Super-kondenzátor se nabíjí pouze tehdy, pokud je hlavní napětí dostatečně vysoké. Toto napětí je vztažené proti úbytkům na R31 a Schottky diodě.



Obrázek 6.13: Napájecí část superCap

Superkondenzátor C17 má následující parametry: kapacita 1 F, jmenovité napětí 3 V, radiální, rozměry 8 mm průměr a 13 mm výška. Rozměry hrály významnou roli při návrhu a realizace boxu.

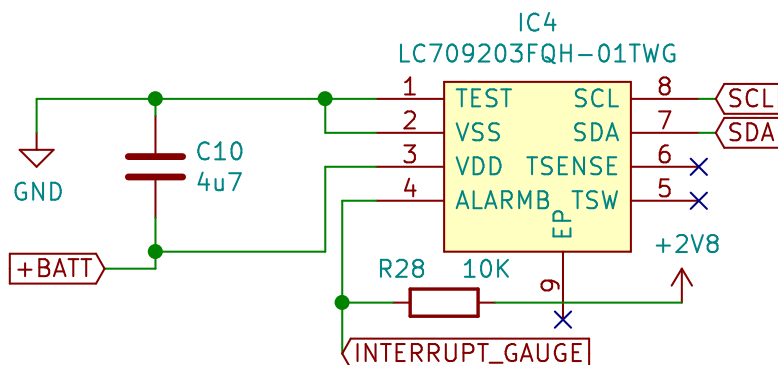
### 6.6.5 Stav baterie

Ukazatel napětí baterie Fuel Gauge LC709203F od firmy ON Semiconductor je určený pro monitorování stavu jedné Li-Ion baterie. Rozsah měřitelného napětí je od 2,5 V do 4,5 V. Data poskytuje pomocí sběrnice I<sup>2</sup>C. Obvod byl vybrán v pouzdře WDFN-8.

LC709203F je součástí rodiny Smart LiB Gauge, která měří stav baterie RSOC (Relative State Of Charge), pomocí unikátního algoritmu HG-CVR.

HG-CVR eliminuje použití externího snímacího odporu a poskytuje přesné informace i při nestabilních podmínkách.

Základní parametry obvodu: přesnost RSOC 2,8 %, přesnost napětí  $\pm 7,5$  mV a spotřeba 3  $\mu$ A.

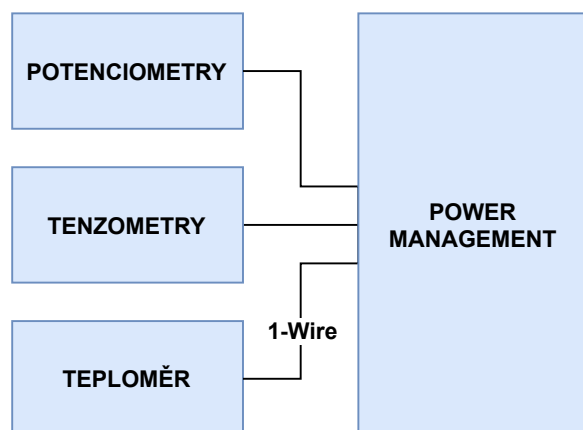


Obrázek 6.14: Napájecí část Fuel Gauge

K obvodu lze připojit externí termistor pro využití teplotní kompenzace. Je vhodný pro aplikace jako jsou telefony, MP3 přehrávače, digitální kamery a podobné bateriově napájené zařízení.

## 6.7 Power management a konektory

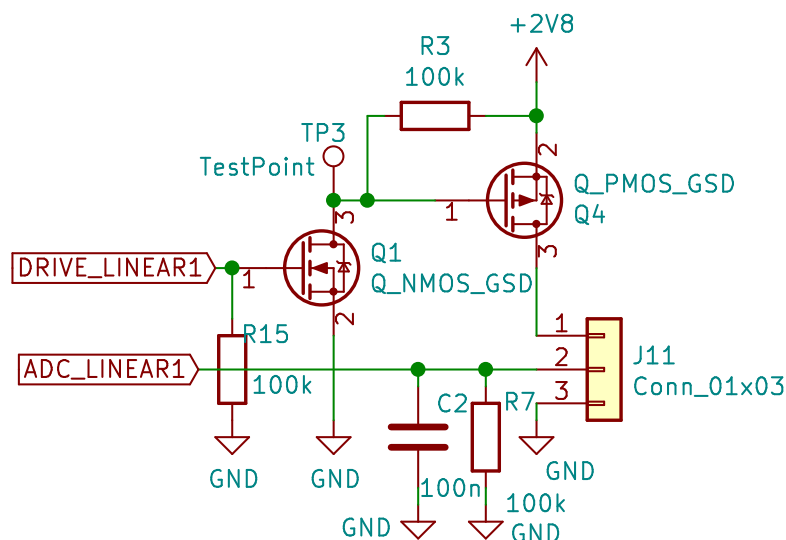
V této podkapitole je návrh kontroly napájení k jednotlivým částem. Na obr.č. 6.15 je blokové schéma, které vychází ze základního blokového schématu 6.1. Ve výsledném zařízení je celkem 5 konektorů, které slouží k připojení dvou lineárních potenciometrů, dvou tenzometrů a jednoho digitálního teplotního senzoru.



Obrázek 6.15: Power management & konektory

Každý konektor je realizován podle následujícího obr.č. 6.16. Toto zapojení je realizované PMOS a NMOS tranzistorem, které zajistí nemožnost napájení MCU přes GPIO ADC pinu. Kdyby byl power management realizován pouze

pomocí NMOS tranzistoru, mohlo by se stát, že přes zapojený potenciometr by mohlo dojít k průchodu napájení do GPIO pinu a tím napájet MCU. Zapojení obsahuje pull-down rezistory, aby bylo možné indikovat připojený senzor. Připojené pull-down rezistory způsobí mírné omezení rozsahu měření.



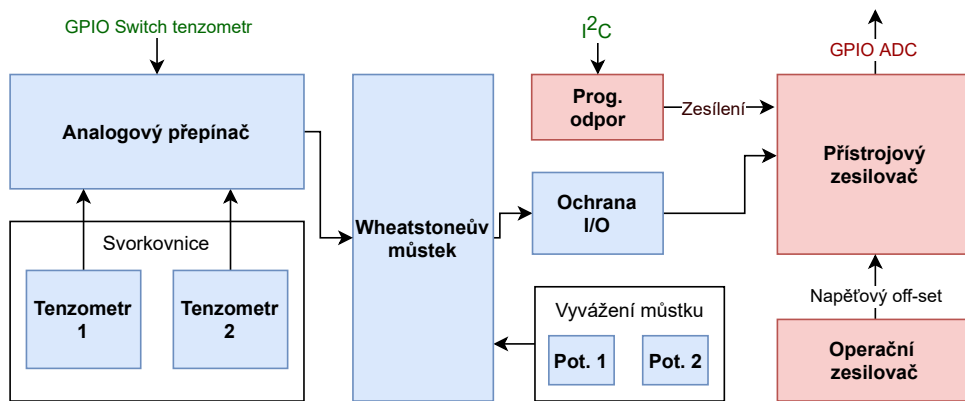
Obrázek 6.16: Power management realizace

U zapojení digitálního teploměru DALAS DS18B20 je schéma doplněno o pull-up rezistor na I/O pinu využívající 1-Wire. U tenzometrů je power management realizován obdobně jako na obr.č. 6.16.

Napájení OLED displeje, který je připojený pomocí I<sup>2</sup>C, je realizováno pomocí vícekanálového analogového přepínače. V první verzi byl power management řešen obdobně podle schématu č. 6.16, ale bylo zjištěno, že kvůli pull-up rezistorům na sběrnici je možné OLED napájet. Proto je nutné odpojit s napájením i sběrnici I<sup>2</sup>C.

## 6.8 Tenzometry

Pro vyhodnocování změn odporu tenzometru bylo potřeba využít Wheatstoneův můstek, který je doplněný o analogový přepínač vstupní svorkovnice, vyvažovacích víceotáčkových potenciometrů, ochran, přístrojový zesilovač, operační zesilovač a programovatelný odpor. Blokové schéma je znázorněno na obr.č. 6.17.



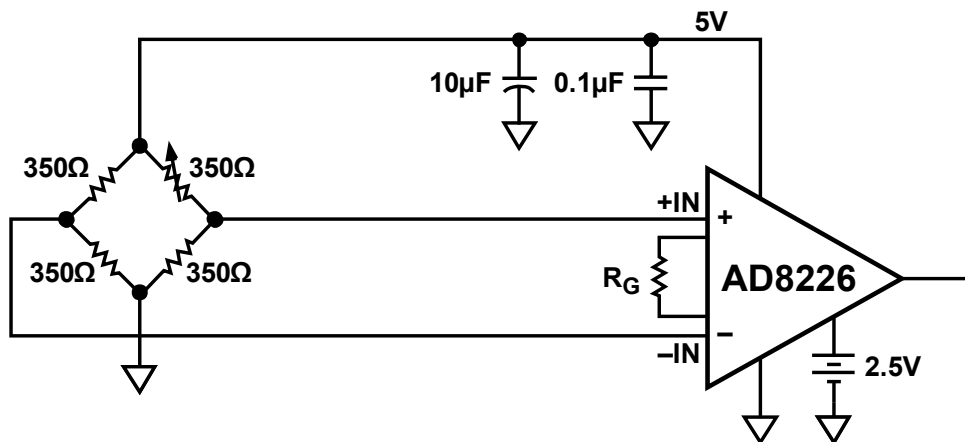
Obrázek 6.17: Návrh části tenzometrů

Analogový přepínač byl vybrán ADG849YKSZ-500RL7 v pouzdře SC-70, který má v sepnutém stavu typicky odpor  $0,5 \Omega$ . Vyvážení můstku se provádí pomocí víceotáčkových potenciometrů. Pro snazší vyvážení bylo těmto potenciometrům předřazen odpor tak, aby byl můstek více citlivý na vyvážení kolem hodnoty odporu  $120 \Omega$ .

Pro zesílení malé změny napětí v můstku byl využit přístrojový zesilovač AD8226ARZ v pouzdře SO8. Zesílení se tomuto zesilovači nastavuje pomocí jednoho externího odporu. Aby bylo možné zesílení softwarově měnit, byl přidán do zapojení programovatelný odpor MCP4017T-103E/LT v pouzdře SC-70. Operační zesilovač slouží pouze k posunutí (off-setu) napětí, které je vyhodnocováno, na polovinu napájecího napětí, protože vyhodnocování změn tenzometrů mohou být kladné i záporné.

### 6.8.1 Nastavení zesílení

Typické zapojení přístrojového zesilovače AD8226 pro měření v můstku je znázorněno na obr.č. 6.18. Reference nesmí být realizována pomocí jednoduchého odporového děliče, proto byl využit operační zesilovač dle doporučení výrobce [38].



Obrázek 6.18: Typické zapojení zesilovače v můstku [38]

Zesílení AD8226 je dáno následujícím vztahem [38] :

$$G = 1 + \frac{49,4k\Omega}{R_G} \quad (6.1)$$

Programovatelný odpor MCP4017T-103E/LT byl vybrán s maximální hodnotou odporu 10 k $\Omega$ . Tato hodnota odporu se dá programově rozdělit na 128 kroků. V návrhu je tedy možné nastavit hodnotu zesílení G(požadované) od 1x do 1 000x. Nastavené zesílení programovatelného odporu G(program) je dáno úpravou uvedeného vztahu na:

$$G_{(program.)} = \left( \frac{49,4k\Omega}{G_{(požadované)} - 1} \right) / \left( \frac{10k\Omega}{127} \right) \quad (6.2)$$

U výběru programovatelného odporu je důležité dát pozor na způsob vnitřní realizace proměnného odporu. MCP4018 má jeden ze tří vstupů uzemněný a je označený jako potenciometr. MCP4017 je označen jako reostat a je vhodný pro použití jako proměnný odpor pro přístrojový zesilovač. Pokud by došlo k záměně, dojde k nenávratnému zničení přístrojového zesilovače.

Další úprava uvedených vztahů může zapříčinit použití obdobného přístrojového zesilovače AD8227, který se liší pro naše použití především v rozsahu možného nastavitelného zesílení 5x až 1 000x a dále zesílením, které je dáno vztahem [39]:

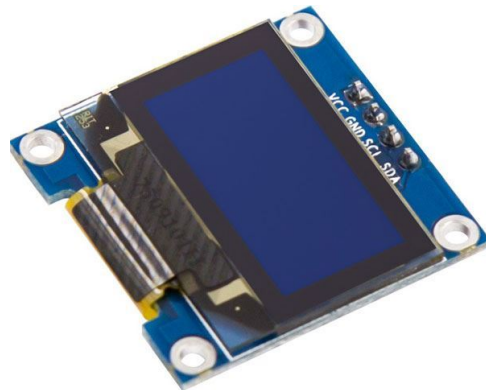
$$G = 5 + \frac{80k\Omega}{R_G} \quad (6.3)$$

## 6.9 LCD displej a ovládací prvky

Pro účely zobrazení byl vybrán jednobarevný OLED displej s úhlopříčkou 0,96". Driver obsluhující displej je SSD1306 a pro propojení je využita I<sup>2</sup>C sběrnice. Rozlišení displeje je 128 × 64 pixelů.

I když je na stránkách prodejce uvedené rozdílné rozmezí provozního napětí, kdy většinou začíná na 3,3 V a končí na 5 V, tak v datasheetu SSD1306 se dočteme, že napájení logiky je v rozmezí od 1,65 V do 3,3 V a napájení podsvícení panelu je v rozmezí od 7 V do 15 V. Pro tyto požadované rozsahy je v hotovém modulu integrována nábojová pumpa, která je hlavním omezením pro minimální hodnotu napájení. V čínském referenčním manuálu (z neoficiálních zdrojů) byla nalezena minimální hodnota 2,5 V pro měnič napětí. Testováním bylo zjištěno, že se displej zapne již při 2 V a je použitelný od 2,5 V.





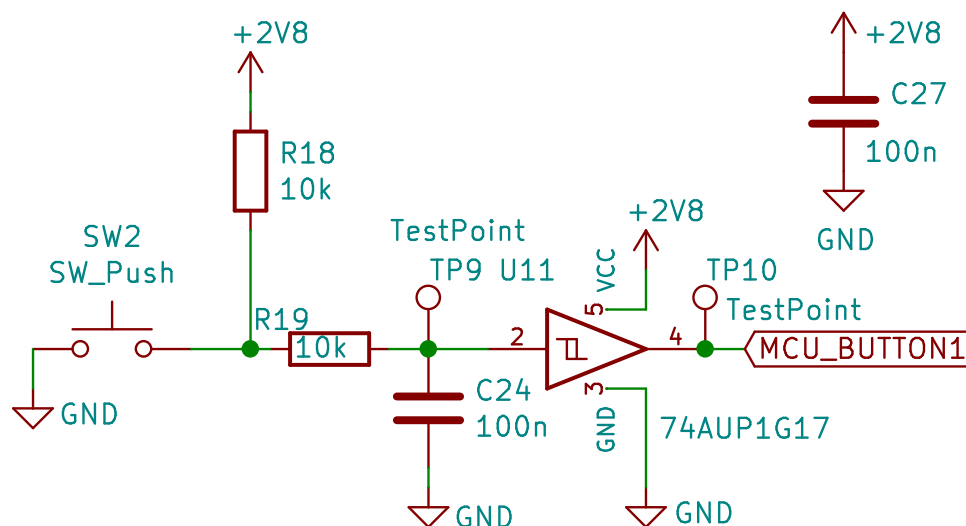
**Obrázek 6.19:** Displej OLED 0,96"

Uživatelská tlačítka jsou dvě a realizace jednoho z nich je uvedena na obr. č. 6.20.

V tomto zapojení jsou hardwarově ošetřeny zákmity tlačítka (Switch De-bounce). Prakticky se jedná o zajištění správného překlopení logického stavu bez zákmitů, které by mohly být vyhodnoceny jako vícenásobné stisknutí. Základní ošetření zákmitů je možné realizovat připojeným kondenzátorem a odporem k tlačítku. Tímto způsobem vznikne RC filtr. Spolehlivější způsob je využití logických hradel jako například AND a OR, kde se dá realizovat základní R-S obvod.

Dalším způsobem je využití Schmittova klopného obvodu spolu s RC filtrem. Tohoto velice cenově dostupného řešení jsem využil.

Nejdražším a nejsnadnějším způsobem je využití integrovaných obvodů, které řeší zákmity tlačítek. Prakticky se jedná o obvod, který se zapojí mezi MCU a tlačítka.

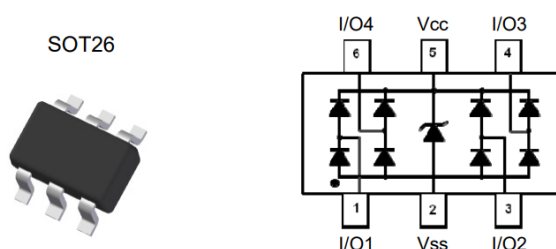


**Obrázek 6.20:** Obvod pro potlačení zákmitů tlačítka

## 6.10 Ochrany

U všech nezakrytých GPIO byly použity ESD ochrany. To znamená, že ESD ochrany jsou použity u všech ADC vstupů, 1-Wire sběrnice, IQRF modulu a SD karty.

Byla vybrána nejlevnější a nejvhodnější ochrana DT1042-04SO-7 v pouzdře SOT-26. Na obr.č. 6.21 je vnitřní uspořádání součástky. Tento typ vnitřního zapojení považuji za zcela vyhovující. Podobně jsou řešeny i ochrany GPIO v samotném MCU.



Obrázek 6.21: 4 kanálová ESD ochrana

## 6.11 SD karta

Pro lokální ukládání měřených dat, byla zvolena paměťová karta micro SD. Pokud bude připojený IQRF modul, ukládání se bude provádět nezávisle na bezdrátovém přenosu. SD karta musí být naformátována na souborový systém FAT.

Základem karet je paměť typu flash. Díky nízké spotřebě energie jsou určeny pro bateriově napájené zařízení. Existují různé varianty dostupných karet, které se mohou lišit například v rychlostních třídách a druhu zabezpečení.

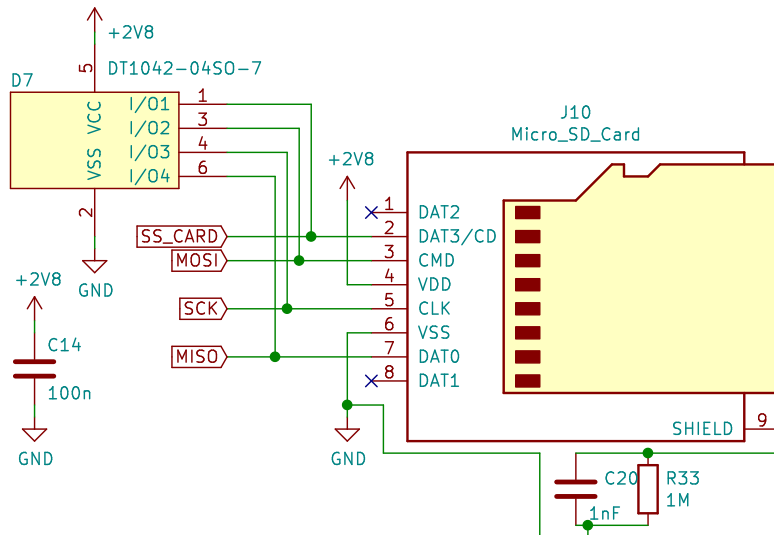
Paměťové karty SD a MMC podporují následující režimy:

- **SPI mód** – rozhraní podporováno většinou mikrokontrolérů,
- **1bitový mód** – proprietární protokol pro přenos dat,
- **4bitový mód** – vysokorychlostní verze rozhraní využívající 4 datové vodiče,
- **8bitový mód** – vysokorychlostní verze rozhraní využívající 8 datových vodičů.

Protože SPI sběrnice patří mezi často používané sběrnice a existují dostupné HAL knihovny pro STM32, byl zvolen SPI mód.

Karty SD obsahují MCU, který poskytuje informace o dostupnosti hlavnímu MCU. Hlavní MCU vidí SD kartu jako adresovatelný sektor, na kterém jsou možné funkce čtení a zápis. Rozsah napájecího napětí SD karet je v rozmezí od 2,7 V do 3,6 V, takže není nutné řešit level shifter.

Jakmile je MCU v režimu SPI, probíhá komunikace mezi masterem a slave pomocí 4 pinů. Na obr.č. 6.22 je vidět zapojení micro SD karty, které je doplněné o ESD ochranu D7 a základní ochranu R22 a C20.



Obrázek 6.22: Micro SD karta SPI mód

### 6.11.1 Soubory

Po vložení a připojení karty se na hlavní obrazovce displeje objeví nápis SD a v menu SD CARD lze vidět velikost celkové a zabrané paměti. Pokud je karta prázdná, vytvoří se soubor readme.txt, measureAll.txt a "datum".txt, kde datum je nahrazeno datem každého započteného dne.

Readme.txt obsahuje následující text:

- **Project:** Wireless Data Acquisition System - Diploma thesis
- **Version:** PCB rev3; SW 12.4.2020
- **Author:** Čebiš Vladimír
- **Description:** This unit measures temperature, humidity, and the air pressure inside the housing using the BME280 sensor. It can also manage external devices such as temperature sensors, voltage dividers, and tensometric sensors. The main goal of the solution is low as possible current consumption.
- **SETUP** - can be set using IQRf wireless technology or manually.
  - **Unit.** is only information unit number for better identification.
  - **Int.** is the interval that tells how often the unit measures and stores. Set in seconds from 5 to 3600 or more...
  - **Gain** is the gain value for the instrumentation amplifier that evaluates the voltage changes in the bridge circuit for tensometric sensors.

- **RTC** - can be set using I2C wireless technology or manually.
  - Time is an actual time
  - Date is an actual date
- **BME280** - is humidity sensor measuring relative humidity, barometric pressure and ambient temperature. The sensor is integrated directly on the PCB.
- **Dallas** - DS18B20 is a digital thermometer that connects to the PCB terminal block
- **Linear** - are 2x ADC which can be used for measure linear changes of voltage divider
  - **Conn.** Information about what is currently connected. (0 = nothing); (1 = first slot); (2 = second slot); (3 = both slots connected).
  - **LIN1** and **LIN2** are ADC value. Range of value LIN1 and LIN2 is 5 to 100 %.
- **Tensometric** - contain 2x ADC, which are supplemented with Wheatstone bridge and instrumentation amplifier. This circuit ensures that the unit can evaluate even small changes in resistance.
  - **Conn.** Information about what is currently connected. (0 = nothing); (1 = first slot); (2 = second slot); (3 = both slots connected).
  - **TENS1** and **TENS2** are ADC value. Range of value LIN1 and LIN2 is 10 to 100 %.
  - \*Gain have to be set in setup. \*For using tensometric sensor is necessary to balance wheatstone bridge to 50% using 'tensometric balancing' multiturn potentiometer located on the top of the PCB.
- **Battery** - contains values related to the current battery status.
  - **Day** is number of days from fully charged battery.
  - **Percent** is the percentage of battery power.
  - **Voltage** is the actual value of voltage battery in miliVolts.

Soubory s naměřenými daty lze snadno exportovat do Microsoft Excel, kde je potřeba zvolit oddělovací znak "|".

## 6.12 I2C

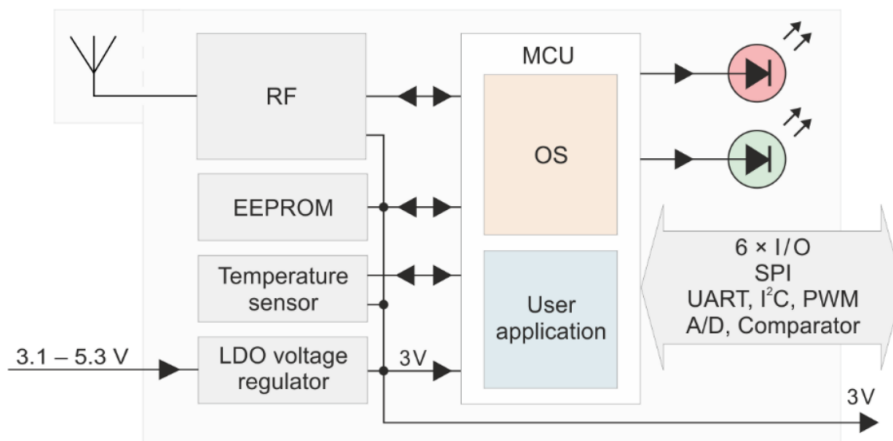
Pro bezdrátové poskytování dat byl vybrán modul transceiveru TR-72D. Moduly transceiveru obsahují 8bitový mikrokontrolér PIC16LF1938-I/MV od firmy Microchip. Blokové schéma je uvedeno na obr.č. 6.23.

MCU má implementovaný vlastní operační systém, který je možné rozšířit pomocí DPA (Direct Peripheral Access) frameworku, který usnadňuje práci

s modulem v případě použití IQMESH sítě. Dále je možné využít možnosti nahrání vlastního uživatelského programu (Custom DPA Handler), který může obsahovat mnoho funkcí OS MCU. Přenos dat probíhá na frekvencích 868 MHz nebo 916 MHz dle nastavení uživatele. Jedná se o ISM pásmo, které dovoluje schváleným zařízením provoz bez licenčních poplatků. Uživatel si dále může zvolit kanál v daném pásmu a sílu vysílání signálu. Rychlost (bit rate) je napevno nastavena na 19,8 kb/s [40].

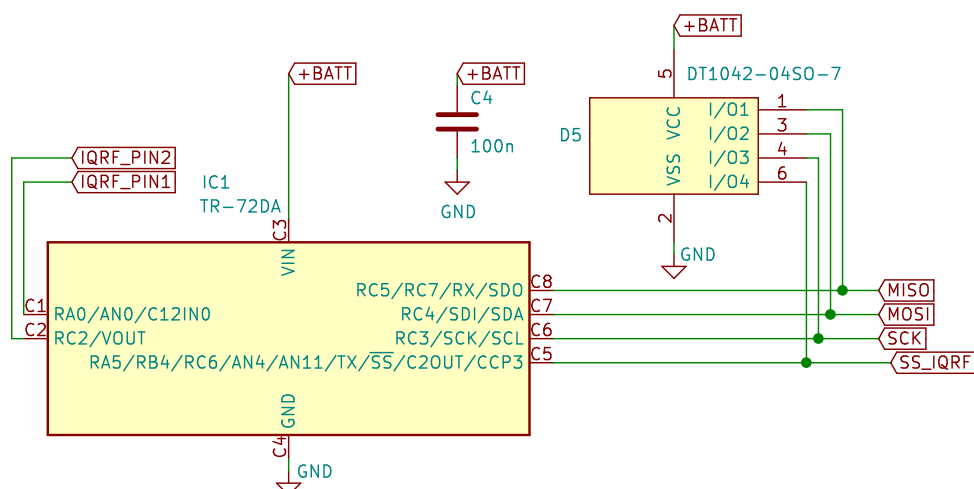
DPA protokol je nástavbou na operační systém IQRF a je dodán ve formě pluginu. Jedná se o protokol pro přímý přístup k perifériím zařízení IQMESH. Data jsou ve formátu little-endian. Sekvence je složena s dotazu (Request), potvrzení (Confirmation) a odpovědi (Response). Paket obsahuje parametry pro jednoznačné určení příjemce (odesílatele) a periférie. Pracoval lze ve dvou RF režimech LP (low power) a STD (Standart power). Volba se provádí pomocí nahrání pluginu dle zvoleného RF režimu. [41]

V rámci IQMESH, kde je DPA protokol implementován, jsou přidělovány pro zařízení dvě role Node a Coordinator. Pro vytvoření propojení je nutné jednotlivé prvky propojit pomocí svázání (bond). [41]



**Obrázek 6.23:** Blokové schéma IQRF modulu - TR-72D

Z blokového schématu je vidět, že modul obsahuje LDO na 3 V. Jelikož ve svém návrhu využívám napájecí napětí 2,8 V, uvažuji s tím, že není potřeba řešit level shifter mezi propojením IQRF modulu a hlavním MCU. Napájecí napětí se má pohybovat v rozsahu 3,1 V až 5,3 V a proto je modul napájen přímo z baterie. Schéma zapojení je vidět na obr.č. 6.24. V zapojení je zakomponovaná ESD ochrana D5 a dále jsou propojeny piny C1 a C2 s hlavním MCU. Tyto piny budou sloužit k probuzení MCU, pokud přijme data, a také k možnosti svázání (bond) či rozvázání (unbond) modulu. Aby bylo možné probouzet pinem C1 (IQRF\_PIN1) hlavní MCU, je nutné nahrát vlastní uživatelský program tzv. Custom DPA Handler, ve kterém využiji metodu `DpaEvent_ReceiveDpaRequest`.



Obrázek 6.24: Schéma zapojení TR-72D

### 6.12.1 Způsob komunikace

V této podkapitole stručně popíšu způsob komunikace s moduly IQRF. IQRF moduly lze propojit pomocí sběrnic UART a SPI. Pro propojení byla zvolena SPI sběrnice, která mi původně přišla jednodušší, ale zpětně bych určitě zvolil UART. U SPI je nutné řešit probouzení MCU a neustálé dotazování se na stav, jestli modul má připravená data.

Při použití SPI se musí MCU každých 10 ms ptát dotazem na MOSI pomocí tzv. dummy bytu (0x00). Na MISO dostává MCU odpověď o stavu podle následující tabulky 6.12.1:

HEX	SPI status
00 nebo FF	SPI neaktivní nebo SPI neaktivní (HW error)
07	SPI pozastaveno
3F	SPI není připraven, buffer plný, poslední kontrolní součet správný
3E	SPI není připraven, buffer plný, poslední kontrolní součet nesprávný
40 do 79	SPI data připravena, kde délka zprávy je hodnota - 40
80	SPI připraven – komunikační mód
81	SPI připraven – programovací mód
82	SPI připraven – debug mód

Tabulka 6.2: SPI status

k základnímu otestování lze využít IQRF IDE4, kde je potřeba nahrát pouze plugin DPA-Coordinator-SPI-7xD do koordinátora a DPA-Node-STD-7xD do noda. V IQRF IDE4 lze v SPI test otestovat dotazem 0x00, jestli je SPI ready a odpovídá 0x80. Plugin STD nešetří energii, a proto se pro bateriově napájené zařízení využívá plugin LP. Při použití tohoto LP pluginu nelze otestovat sběrnici, jestli na dotaz 0x00 vrací SPI ready 0x80. Modul se totiž uspí. [42]

Obecná struktura vysílaného packetu i odpovědi IQRF modulu je znázorněna v tabulce č. 6.12.1. V této tabulce je uveden i příklad barevně rozlišený.

Poslání dat z koordinátora								
FO	80+DÉLKA	NANDR	PNUM	PCMD	HWPID	MOJE DATA	CRCM	DUMMY
<b>F0.8C.01.00.08.00.FF.FF.FF.48.65.6C.6C.6F.97.00.</b>								
Přijmutí dat na node z koordinátora								
FO	0+DÉLKA	DÉLKA X DUMMY (0x00 ... 0x00)				CRCM	DUMMY	
<b>F0.05.00.00.00.00.00.AA.00</b>								

Tabulka 6.3: Struktura zprávy

Na straně koordinátora délka zahrnuje NANDR + PNUM + PCMD + HWPID + MOJEDATA(Hello) + CRCM = C

NANDR je adresa NODU = 01.00.; PNUM je číslo periferie a pro SPI = 08; PCMD - Příkaz; HWPID - Hardwarová identifikace; Moje data - například: Hello = 48.65.6C.6C.6F; CRCM = kontrolní součet

Pro zapsání dat z MCU do IQRF modulu, který je nastaven jako node, uvádím následující příklad, kde posílám znaky 'H','e','l','l','o'.

MOSI: '0' (0x00)	dummy	MISO: '128' (0x80)	SPI READY
MOSI: '0' (0x00)	dummy	MISO: '128' (0x80)	SPI READY
MOSI: '0' (0x00)	dummy	MISO: '128' (0x80)	SPI READY
MOSI: '0' (0x00)	dummy	MISO: '128' (0x80)	SPI READY
MOSI: '240' (0xF0)	Příkaz Write/Read	MISO: '128' (0x80)	SPI READY
MOSI: '134' (0x86)	Délka 6 znaků	MISO: '128' (0x80)	SPI READY
MOSI: '20' (0x14)	1 znak	MISO: H (0x48)	
MOSI: '+' (0x2B)	2 znak	MISO: e (0x65)	
MOSI: '255' (0xFF)	3 znak	MISO: l (0x6C)	
MOSI: '255' (0xFF)	4 znak	MISO: l (0x6C)	
MOSI: '0' (0x00)	5 znak	MISO: o (0x6F)	
MOSI: '0' (0x00)	6 znak	MISO: '0' (0x00)	
MOSI: '22' (0x16)	CRCM	MISO: '155' (0x9B)	CRCM
MOSI: '0' (0x00)	dummy	MISO: ? (0x3F)	Buffer plný + CRC je správný
MOSI: '0' (0x00)	dummy	MISO: ? (0x3F)	Buffer plný + CRC je správný

Tabulka 6.4: IQRF ukázka komunikace po SPI

IQRF moduly se prakticky používají již s hotovým DPA protokolem na straně koordinátora. Proto se většinou nepřístupuje na straně noda a na straně koordinátora stejným způsobem.

Struktura zprávy DPA protokolu :

NANDR (Lo)	NANDR (Hi)	PNUM	PCMD	HWPID (Lo)	HWPID (Hi)	ErrN	PDATA
------------	------------	------	------	------------	------------	------	-------

Tabulka 6.5: DPA struktura

Struktura PDATA jsou navrženy podle následující tabulky 6.12.1. Dále následuje příklad nastavení a čtení 6.12.1. Koordinátor dostane response i při prvotním nastavení.

COORDINATOR - PDATA pomocí DPA											
PDATA[]	1	2	3	4,5	6	7	8	9	10	11	12
Velikost [Byte]	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1
Název	SPI_CMD	UNIT	PŘÍKAZ	INTERVAL	HOD	MIN	SEC	DEN	MĚŠ	ROK	ZESÍLENÍ
Popis	FO.FE.FF	*Adresa	*Nastav	*Měření	*Aktuální čas MCU					*Tenzometr	

pozn.: Coordinátor musí na počátku nastavit UNIT, INTERVAL, ČAS, poté se již může ptát jen na stav senzorů. Příkaz 1

Tabulka 6.6: Struktura zpráv PDATA

Příklad nastavení:										
SPI_CMD	UNIT	PŘÍKAZ	INTERVAL	HOD	MIN	SEC	DEN	MĚŠ	ROK	ZESÍLENÍ
F0.	01.	01.	00.14.	12.	30.	00.	02.	13.	20.	01.
Write/read	Adresa	Nastav	Po 20s	12	30	0	2	13	20	

Příklad čtení:	
SPI_CMD	PŘÍKAZ
F0.	00.
Write/read	Čti

Tabulka 6.7: Struktura zpráv PDATA Koordinátor - příklad

Následující tabulka popisuje strukturu dat, které se budou předávat IQRF modulu po SPI sběrnici z hlavního MCU.

PDATA[]	0	1,2	3	4	5	6	7	8	9,10	11	12,13
Velikost [Byte]	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	2
Název	UNIT	INTERVAL	HOD	MIN	SEC	DEN	MĚŠ	ROK	TEPLOTA	VLHKOST	TLAK
Popis	*Adresa	*Měření	*Aktuální čas MCU					*BM280			

PDATA[]	14	15,16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26,27
Velikost [Byte]	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
Název	ZAŘÍZENÍ	TEPLOTA	ZAŘÍZENÍ	LINEAR1	LINEAR2	ZAŘÍZENÍ	ZESÍLENÍ	TENZ1	TENZ2	DNY	%	V
Popis	*Dallas		*Lineární posuvy			*Tenzometry			*Baterie			

Tabulka 6.8: Struktura zpráv PDATA Node - příklad

Pro objasnění hodnot uvádím vysvětlivky:



Vysvětlivky*		
SPI_CMD	( 0xFF - pouze zápis ); ( 0xF0 - zápis a čtení ); ( 0xFE - zápis a čtení s nejdelší možnou dobou "podržení dat" )	hex
UNIT	Je stejná jako adresa NODE, slouží jen pro zobrazení adresy na display ( 0 až 255 ).	dec
INTERVAL	Je hodnota v sekundách, kde první Byte je násobitel a druhý Byte je základ.	
PŘÍKAZ	( 0 = žádné nastavení => zjistí pouze stav senzorů ); ( 1 = nastav vše, Interval, Aktuální čas, Zesílení ).	
ZAŘÍZENÍ	Informace, co je aktuálně připojeno. ( 0 = nic ); ( 1 = připojen první slot ); ( 2 = připojen druhý slot ); ( 3 = připojeny oba sloty ).	
ZESÍLENÍ	Hodnota zesílení změny tenzometrů.	
TEPLOTA	První Byte nabývá hodnot ( 0 až 125 ). Druhý Byte nabývá hodnot ( 0 až 99 ). Př. 1 Měříme 25,68°C 1Byte = 25 ; 2Byte = 68. Př. 2 Měříme -5,36°C 1Byte = 250 ; 2Byte = 36. ( 255 = NC )	
VLHKOST	Nabývá hodnot 0 až 100. Jednotky %.	
TLAK	Nabývá hodnot 0 až 255. Kde 0 = 870hPa což je minimum.	
LINEAR1,2; TENZI,2	Nabývá hodnot 5 až 100, což odpovídá procentuální změně. Hodnota 255 = nepřipojeno nebo mimo pracovní rozsah.	
DNY	Počet dnů od plného nabití baterie.	
%	Nabývá hodnot 0 až 100. Stav baterie v %.	
V	Napětí baterie v mV. Př. Měříme 3758 mV, 1 Byte = 37; 2Byte = 58.	
SEC	Sekundy nabývají hodnot ( 0x00 až 0x59 ).	
MIN	Minuty nabývají hodnot ( 0x00 až 0x59 ).	
HOD	Hodiny nabývají hodnot ( 0x00 až 0x23 ).	
DEN	Den nabývá hodnot ( 0x00 až 0x31 ).	
MĚC	Měsíc nabývá hodnot ( 0x01 až 0x12 ).	
ROK	Rok nabývá hodnot ( 0x20 až 0x99 ).	

Tabulka 6.9: Vysvětlivky - struktura zpráv PDATA

## 6.13 Konstrukce - 3D tisk

Pro umístění výsledné osazené DPS využijí technologii 3D tisku. K vymodelování byl použit dostupný Autodesk Fusion 360.

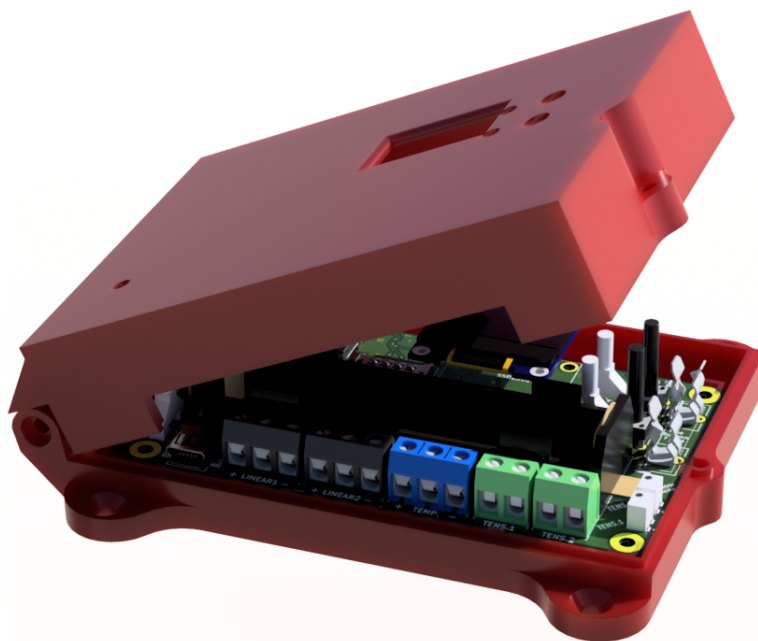
Při návrhu modelu je nutné brát ohled na použité materiály, zvolit vhodné těsnění a navrhnout celý box v kompaktních rozměrech. V poslední fázi je nutné brát ohled i na nastavení tisku, kdy je výsledek ovlivněn řadou parametrů například: výplní, perimetry, podporami a případného zvětšení.

Uvedu zde tři nejpopulárnější materiály využívané k 3D tisku:

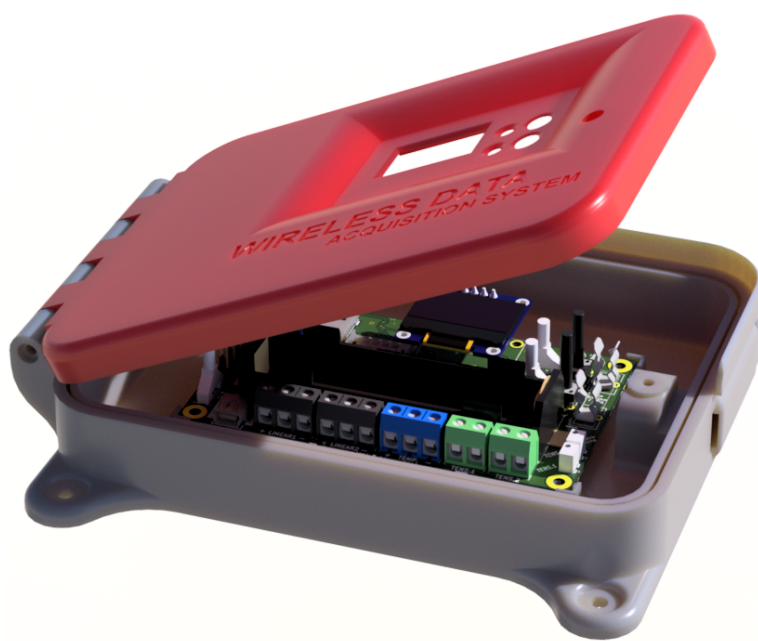
- **PLA** – je rozložitelný termoplast, který se vyrábí z obnovitelných surovin, jako je například kukuřičný škrob. Při teplotě 60 °C ztrácí mechanickou pevnost. Je poměrně levný a na trhu je k dostání v mnoha barevných provedeních. Tiskne se při teplotách 200 – 220 °C [44]
- **ABS** – se vyznačuje vysokou odolností proti mechanickému poškození. Je tuhý, houževnatý materiál, odolný proti kyselinám a hydroxidům. Materiál je odolný teplotám do 100 °C. Teplota zpracování ABS se pohybuje 210 – 250 °C. Nevýhodou je vysoká smrštitelnost (0,3 – 0,7 %) oproti ostatním materiálům. ABS lze lepit pomocí acetonu, toluenu, případně metylenchloridu a poly-akrylátovými lepidly.
- **PETG** – je proti ostatním tiskovým materiálům odolnější vůči kyselinám a rozpouštědlům. Samozřejmostí je, že materiál není toxický, takže může

být používán i jako obalový materiál u potravin. 3D tisk je složitější a pomalejší. Vyznačuje se nemačkovostí a vyšší odolností proti navlhnutí oproti předešlým uvedeným materiálům. Dále je PETG Pružnější a mechanicky odolnější materiál než ABS. [43]

Po prostudování diskuzních fór a z vlastních zkušeností jsem došel k závěru, že pro vnitřní použití by byl nejvhodnější materiál PETG, protože je mechanicky odolný. Nicméně pro venkovní použití, kde je potřeba použít těsnění, je PET příliš pružný. Proto jsem zvolil materiál ABS, který se nejméně deformuje a zároveň se dá po tisku upravit povrch. U tisku z ABS je důležité brát ohled na smršťitelnost materiálu, proto se model musí před vygenerováním výrobních dat vhodně zvětšit.



Obrázek 6.25: 2 verze boxu



**Obrázek 6.26:** 3 verze boxu

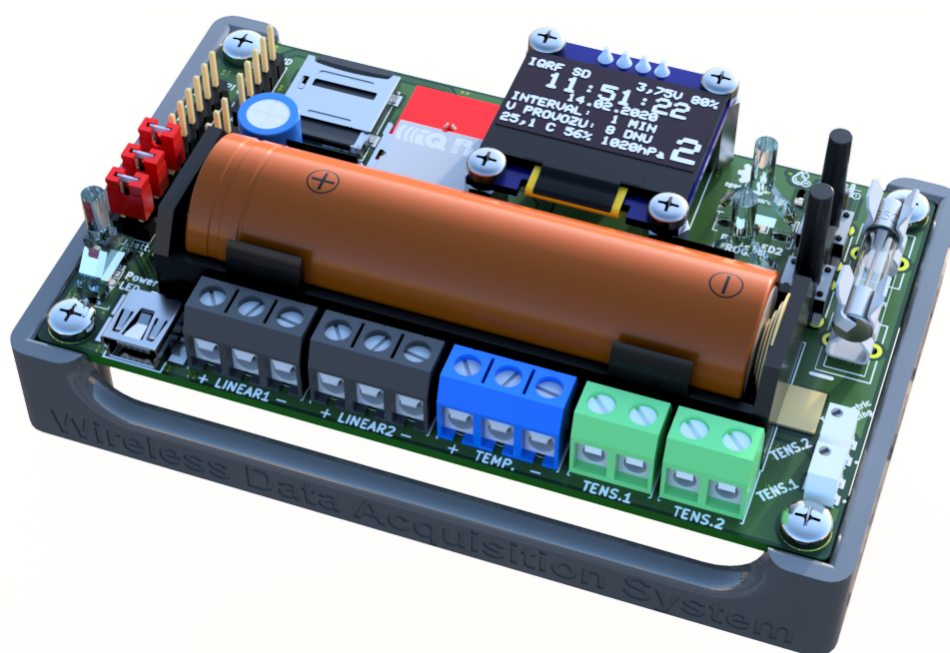
Na obr.č. 6.25 a 6.26 jsou návrhy boxů, ze kterých vznikla finální verze. Výsledná verze boxu 7.13 je uvedena v kapitole realizace vlastního řešení.



## Kapitola 7

### Realizace vlastního řešení

V této kapitole je popsán průběh realizace, kde popíšu jednotlivé revize DPS, postup při ožívování, uživatelské rozhraní, program a výsledný vytištěný box. Dále tato kapitola obsahuje rozklad výsledného boxu se seznamem potřebných dílů. Testování systému je detailně popsáno v kapitole 7.6, která obsahuje informace týkající se spotřeby energie, ukázek grafů z naměřených dat a testování maximální vzdálenosti pro komunikaci.



**Obrázek 7.1:** Výsledná model osazené DPS ve vytisknutém rámečku

## 7.1 DPS

Byly zrealizovány, osazeny a oživeny celkem 3 verze DPS. První verze obsahovala řadu chyb, které bylo nutné opravit a popřípadě vylepšit. Hlavní rozdíl mezi výslednou a první verzí je způsob napájení zařízení a v úpravě tenzometrické části.

### 7.1.1 Revize

**Chyby**, které byly hlavním důvodem nutného opravení, byly následující, začnu od těch nejzávažnějších.

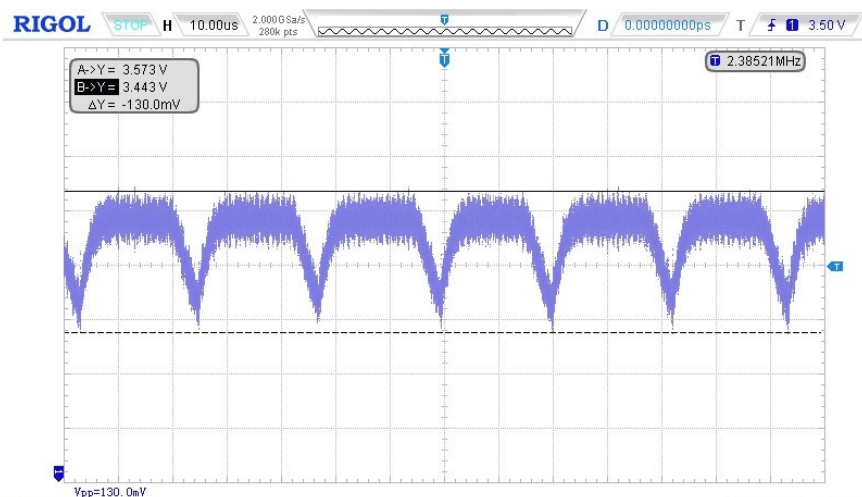
1. Celý power management měl špatně přiřazený foot-print pro PMOS, kdy byl zaměněn gate a source tranzistoru.
2. Reálná rozteč k uchycení displeje neodpovídala rozměrům poskytnutým prodejcem.
3. Footprint pro IQRF slot byl zaměněn za starou verzi.
4. Popis na DPS u tenzometrů a pin-headerů pro debugování byly zrcadlově prohozeny.
5. Chyběl blokovací kondenzátor k level shifteru.

**Vylepšení**, které nebyla překážkou v používání, ale po jejich přidání usnadnila nebo zpříjemnila obsluhu jsou:

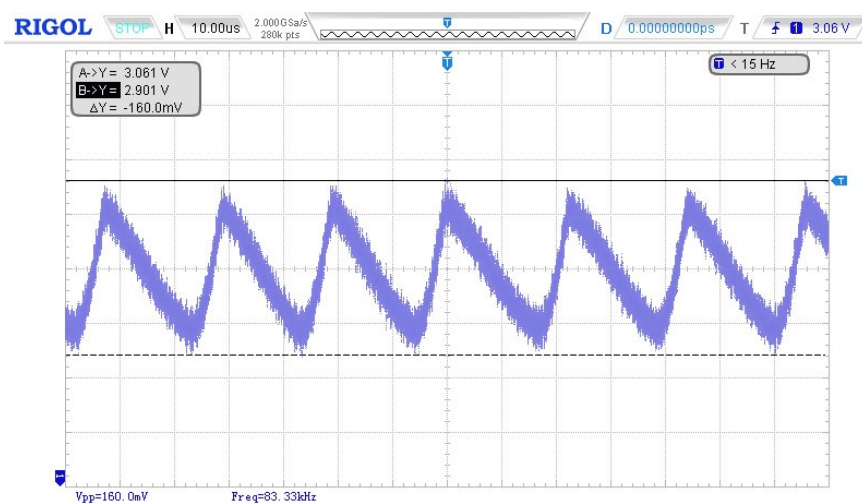
1. Doplnění pull-down odporům k pinům ADC.
2. Předřazení odporů k vyhodnocovací větvi ve Wheatstonovu můstku pro snazší vyvážení.
3. Vyměnění potenciometru, který nastavoval zesílení v tenzometrické části, za programovatelný odpor.
4. Sjednocení ESD ochran do jednoho IO.
5. Upravení rozmístění tlačítek, LED, světlovodů a popisu pod holder baterie.
6. Přidání filtru k napájení DC/DC měniče.
7. Upravení Power managementu pro OLED tak, aby se odpojila i sběrnice.

V druhé revizi DPS vznikla hrubá chyba, kde byla špatně zapojena jedna větev ve Wheatstonově můstku. Přidání filtru na napájení DC/DC měniče pomohlo o cca 50 %, ale i tak bylo zvlnění dost vysoké. Obvod Fuel Gauge měřil stále proměnné napětí baterie, které sice bylo menší oproti první revizi, ale stále bylo dost vysoké. Na následujících oscilogramech jsem zaznamenal průběh výstupního a vstupního zvlnění původní první verze.

Výstupní zvlnění bylo změřeno digitálním osciloskopem hned na výstupním a vstupním kondenzátoru, kde jsem použil sondu s nejmenší možnou zemní smyčkou. Sonda byla vykompenzována a nastavena 1:10. Na osciloskopu byl nastaven BW filtr na 20 MHz. Bylo zkoumáno, jestli má vliv zvlnění zdroje, proto se zdroj Diametral (spínaný zdroj) zaměnil za lineární zdroj TESLA BK127. Zvlnění na vstupu DC/DC měniče bylo totožné.



**Obrázek 7.2:** Vstupní zvlnění DC/DC měniče revize1



**Obrázek 7.3:** Výstupní zvlnění DC/DC měniče revize1

Při testování bylo zjištěno, že výstupní zvlnění DC/DC měniče nemělo vliv na hodnoty z ADC. Usuzuji, že se napájecí napětí měnilo na připojeném senzoru stejně jako na hlavním MCU. Při stejné změně na obou stranách se změna napětí neprojeví. V datasheetu DC/DC měniče je uvedeno výstupní zvlnění přibližně 100 mV.

Ve třetí verzi byl tedy vyměněn DC/DC měnič za stabilizátor a opraven jeden spoj.

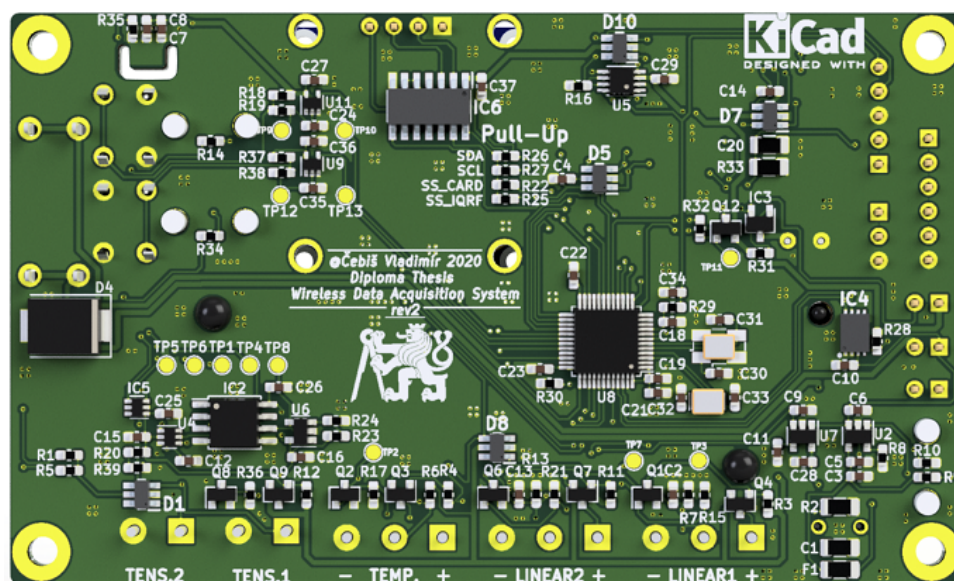
### 7.1.2 Finální verze

Parametry DPS jsou: rozměry 100 x 60 mm, materiál FR4, tloušťka 1,6 mm, šířka cest 0,2 mm, průchodky 0,3 mm a minimální izolace 0,2 mm. Na obr.č. 7.4 a 7.5 jsou uvedeny výsledné modely zařízení. Celkem bylo vyrobeno 10 kusů desek, ze kterých jsou 3 desky plně osazené a oživené.

Na obr.č. 7.6 jsou očíslovány nejdůležitější části desky z pohledu uživatele či programátora.

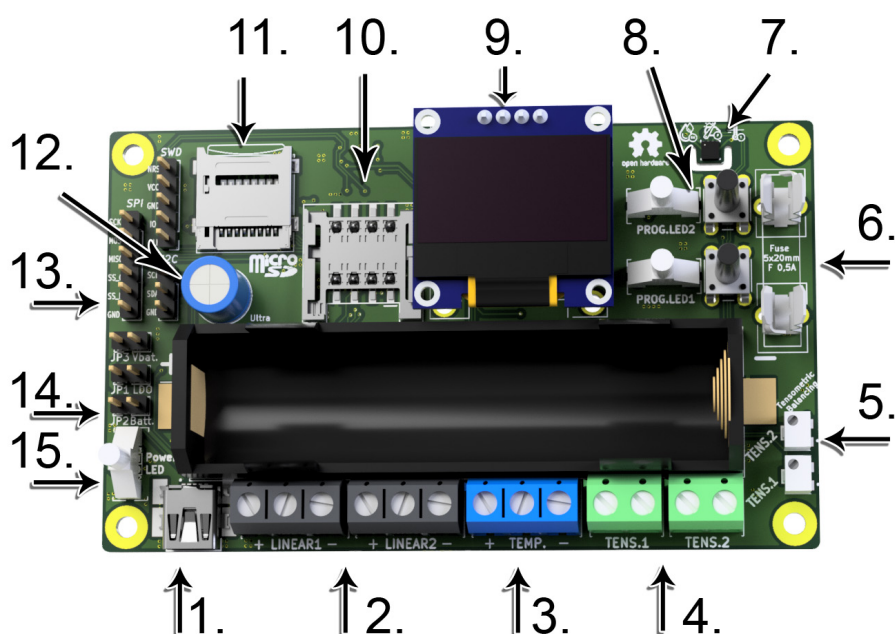


Obrázek 7.4: Model DPS finální revize 3 TOP



Obrázek 7.5: Model DPS finální revize 3 BOTTOM





Obrázek 7.6: Model DPS finální revize 3 popis

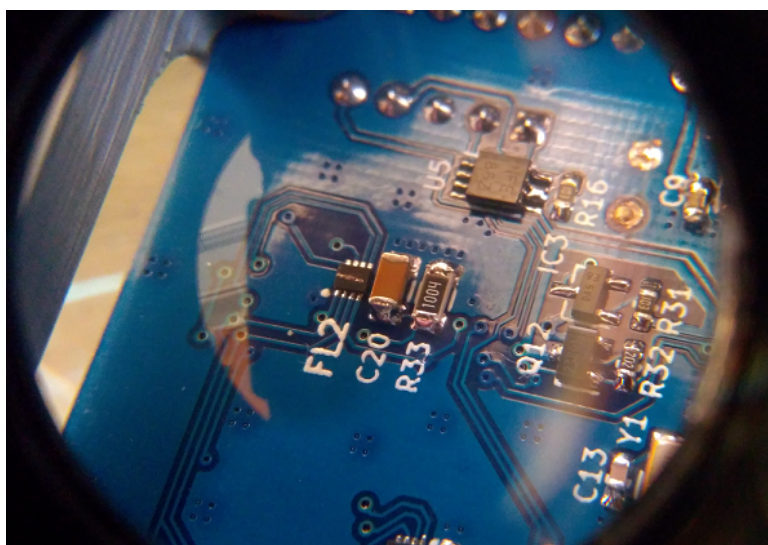
- 1 – USB B mini konektor pro nabíjení baterie
- 2 až 4 – svorkovnice pro připojení senzorů
- 5 – víceotáčkové potenciometry pro vyvážení můstku
- 6 – skleněná pojistka 5x20 F 500 mA
- 7 – senzor BME280 pro měření teploty, vlhkosti a barometrického tlaku
- 8 – uživatelská tlačítka, programovací LED se světlovody
- 9 – OLED displej 0,96"
- 10 – slot pro IQRF modul
- 11 – slot pro microSD kartu
- 12 – superkondenzátor, záložní zdroj energie
- 13 – pin headery pro debugování sběrnic a programování MCU
- 14 – pin headery pro zapojení napájecí části
- 15 – LED k indikaci nabíjení baterie

## 7.2 Osazení, oživení a testování

Před začátkem pájení jsem si změřil napětí mezi mikropájkou a zemním vodičem. Bylo naměřeno cca 80 V AC naprázdno a když jsem se do obvodu "zapojil", kleslo napětí na cca 20 V AC. Proto jsem pájel z power banky, abych tento jev eliminoval. Pravděpodobně bude špatně udělaný USB zdroj pro mikropájkou.

Při pájení první revize jsem začal pájet nejprve ESD ochrany z důvodu poměrně náročného osazení. Původní ochrany byly vybrány s roztečí pinů 0,2 mm. Pro praktickou ukázkou uvádím obr.č. 7.7, kde FL2 je zmiňovaná ESD ochrana. Vedle FL2 jsou pasivní součástky v pouzdře 1206. Fotka je pořízena pomocí desetinásobného přiblížení. Z tohoto důvodu byly v další revizi ochrany nahrazeny za ochrany v pouzdře SOT-23-6.

Jedna deska byla po neúspěšném pájení vyřazena a označena jako nefunkční (KO). Testování probíhalo otestováním integrovaných diod a odporů. Pro testování jsem využil testpointy, které jsem během práce často umístil v kritických místech DPS.



Obrázek 7.7: Původní ESD ochrany

Po osazení ESD jsem oživoval nabíječku s baterií. K otestování nabíječky jsem využil USB testeru, díky kterému jsem změřil nabíjecí proud 500 mA, což souhlasilo podle nastavovacího odporu v obvodu. Obvod pro nabíjení začal postupně proud snižovat dle předpokladů. Signalizace nabíjení také fungovala, kde červená LED indikuje nabíjení a zelená plně nabitou baterii.

První DC/DC měnič byl zničený i přes všechnu opatrnost. Funkčnost byla testována nejprve na laboratorním zdroji, kde bylo nastaveno proudové omezení na minimum a postupně se zvyšovalo napětí zdroje. Na výstupu bylo vždy nula voltů. Druhý obvod byl již v pořádku.

Poté jsem po každém připájení bloku změřil termokamerou teplotu, jestli nějaká součástka z osazovaného bloku nehřeje více, než by měla. Prakticky to

znamená, že pokud by někde byl zkrat, nebo by se součástka během pájení zničila, začala by zahřívat.

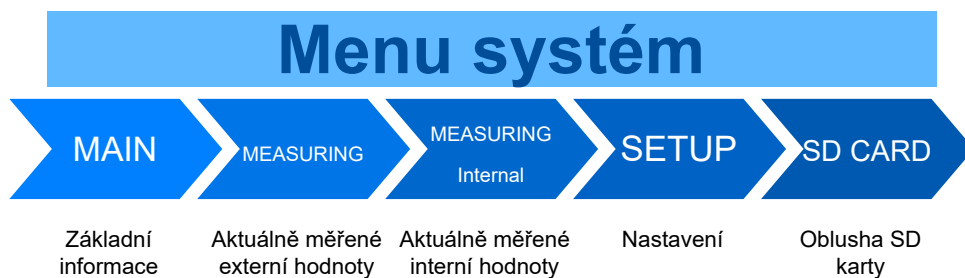
Pro programování jsem využil programátor STM LINK V2 a jako první jsem otestoval, jestli se MCU hlásí a je viditelný pomocí programu STM32 ST-LINK Utility.

Dále byl otestován Smithův klopný obvod zapojený k tlačítku, který funguje dle předpokladů. Jeho funkcí je vytvořit náběžnou a sestupnou hranu při mačkání tlačítka tak, aby nedocházelo k několikanásobným překmitům.

Po otestování byla DPS vždy umyta isopropylalkoholem, lihem a následně propláchnutá vodou.

## 7.3 Uživatelské rozhraní

Pro uživatelskou obsluhu byl navržen jednoduchý menu systém, který je znázorněn na obr.č. 7.8. V menu se přepíná mezi hlavními nabídky pomocí horního tlačítka. Pro vstup do nastavení je nutné zvolit dolní tlačítko, které umožní vybrat položku, a pro vybrání opět slouží tlačítko horní.



Obrázek 7.8: Menu systém

**MAIN** – je úvodní obrazovka zařízení. V levém horním rohu je indikace SD karty. Pokud se zobrazuje SD, karta je inicializována. Pokud je karta vložena a není zkratka SD zobrazena, je nutné kartu inicializovat v menu SD CARD.

Uprostřed je informace o aktuálním času a datu. Tento čas je možné ručně nastavit v menu SETUP, nebo ho nastavit prostřednictvím IQRF. Battery ukazuje napětí baterie spolu s informací kapacity baterie v %. Working je počet dní od posledního nabití na 100 %. Interval je hodnota, jak často se provádí měření v sekundách. Číslo jednotky (Unit numb.) je vpravo dole. Toto číslo slouží jen k lepší identifikaci zařízení.



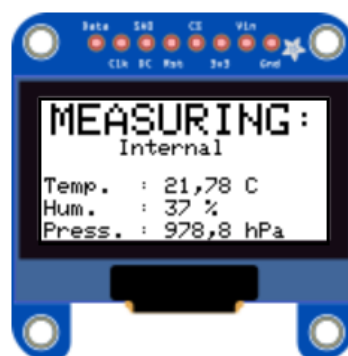
Obrázek 7.9: Ukázka MENU - MAIN

**MEASURING** – zobrazuje všechny aktuální hodnoty z připojených senzorů. LIN1 a LIN2 jsou označeny svorkovnice pro lineární potenciometry. TENS1 a TENS2 jsou označeny svorkovnice pro tenzometry a TENS.Gain je nastavená hodnota zesílení. Dallas zobrazuje hodnotu teploty, pokud je teploměr připojen. Pokud není senzor připojen, je zobrazena hodnota 0, která značí nepřipojeno nebo mimo rozsah.

**MEASURING Internal** – zobrazuje aktuální hodnoty z integrovaného senzoru BME280. BME280 je kombinovaný digitální senzor pro měření teploty, vlhkosti a barometrického tlaku. Temp. je teplota, Hum. je vlhkost prostředí a Press. označuje barometrický tlak.

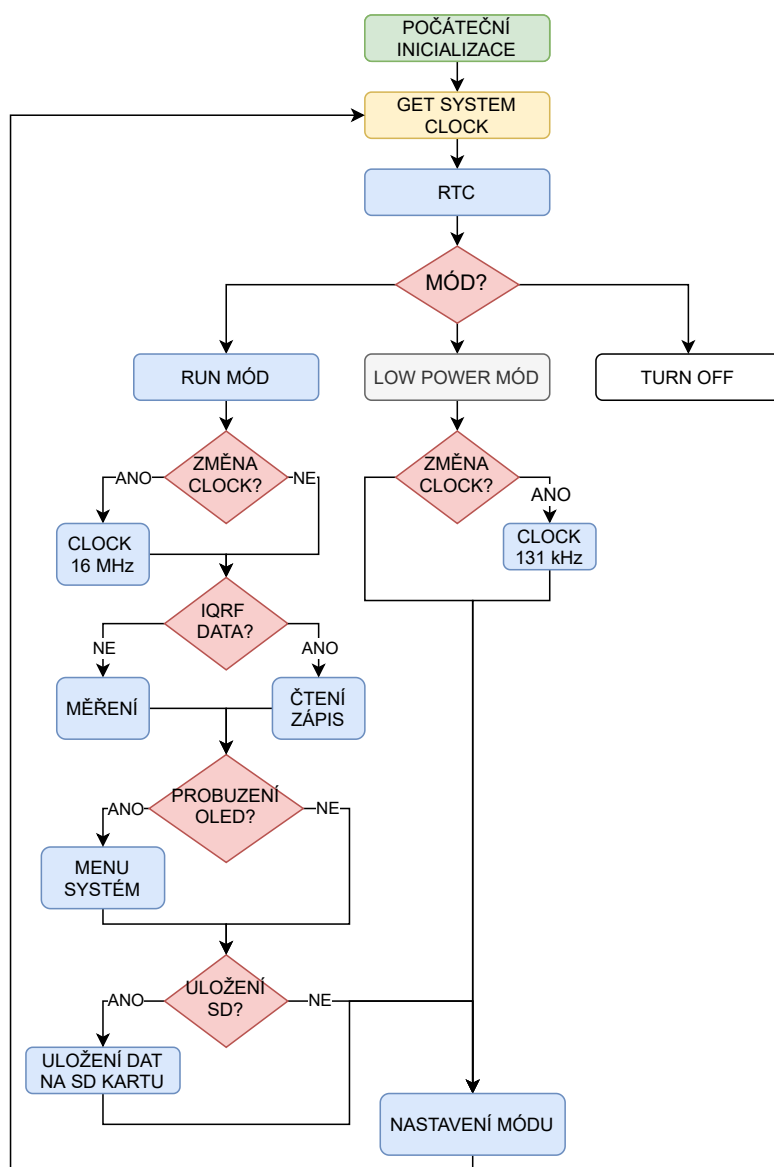
**SETUP** – Nastavení jednotky lze provádět v menu SETUP. Nastavit lze číslo jednotky (Unit.Numb), interval měření (Interval), zesílení tenzometrů ve Wheatstonevě můstku (TEN.Gain), bondování nebo odbondování I2C modulu (Bond/Unbond), čas a datum (Date & Time), po kolika sekundách se vypne displej a jednotka přejde do sleep módu (Sleep). Jednotku lze vypnout pomocí Turn OFF.

**SD CARD** – V této části lze odebrat (Unmount) nebo přidat (Mount) SD kartu. Dále se zobrazuje celková viditelná velikost SD karty a volné místo. Pokud je karta přidána, měly by se zobrazit velikosti. Pokud se nezobrazují, není karta buď naformátována na FAT, nebo je nepodporována.



## 7.4 Program

K naprogramování byl využit Atollic TrueSTUDIO for STM32 9.3.0 spolu s STM32CubeMX. Bylo využito tedy dostupných HAL knihoven, které usnadnily práci hlavně s obsluhou SD karty. Pro bližší seznámení s programem je na následujícím obr.č.7.11 velice stručně znázorněna zjednodušená hlavní programová smyčka.



Obrázek 7.11: Vývojový diagram

Z vývojového digramu 7.11 lze vidět, že se po prvotním připojení napájení provede počáteční inicializace, která zahrnuje nastavení výchozích hodnot, spuštění interních čítačů, RTC a inicializaci všech připojených zařízení. Blok **GET SYSTEM CLOCK** znázorňuje čtení aktuálního kmitočtu systému.

V rozhodujícím bloku **MÓD** se vybere příslušný mód, který se může měnit na základě interakce s tlačítky, dosáhnutím hodnoty vnitřního čítače, nebo při přijetí zprávy z IQRF modulu. Bloky **ZMĚNA CLOCK** mají na starost změnu kmitočtu systému, například pokud má být LOW POWER MÓD a frekvence systému je 16 MHz, provede se změna frekvence na 131 kHz.

Do **RUN MÓDU** se program dostane na základě interakce s tlačítky, dosáhnutím nastavené hodnoty čítače, nebo přerušením vyvolaným IQRF modulem. Na konci RUN MÓDU se program nastaví opět do LOW POWER MÓDU pouze tehdy, pokud neproběhla interakce s tlačítky po nastavenou dobu "Sleep", nebo byl displej vypnutý.

V bloku **MĚŘENÍ** se provede změření všech hodnot ze senzorů, přičemž se uloží hodnoty do bufferu, který se následně uloží na SD kartu, nebo se vyvolaným přerušením poskytnou IQRF modulu.

Probuzení OLED displeje probíhá pouze na základě interakce s tlačítky. Pokud interakce proběhne, spustí se displej na hlavní stránce MAIN. V následném bloku **ULOŽENÍ SD** proběhne uložení hodnot do souboru. Pokud soubor neexistuje, vytvoří se automaticky, například pokud začne nový den, vytvoří se automaticky nový soubor s názvem data. Paralelně s vytvořeným novým souborem se ukládají všechna měřená data do souboru MeasureALL.txt.

## 7.5 Konstrukce

V této kapitole jsou uvedeny názorné rozpady dílů s uvedeným popisem. Do konstrukce jsou zahrnuty všechny vytištěné díly, které mohou být použity při ožívání, ale i díly, které jsou potřebné pro sestavení. Na následujících obrázcích 7.13 a 7.14 je uvedena výsledná verze boxu v šedočerném provedení.

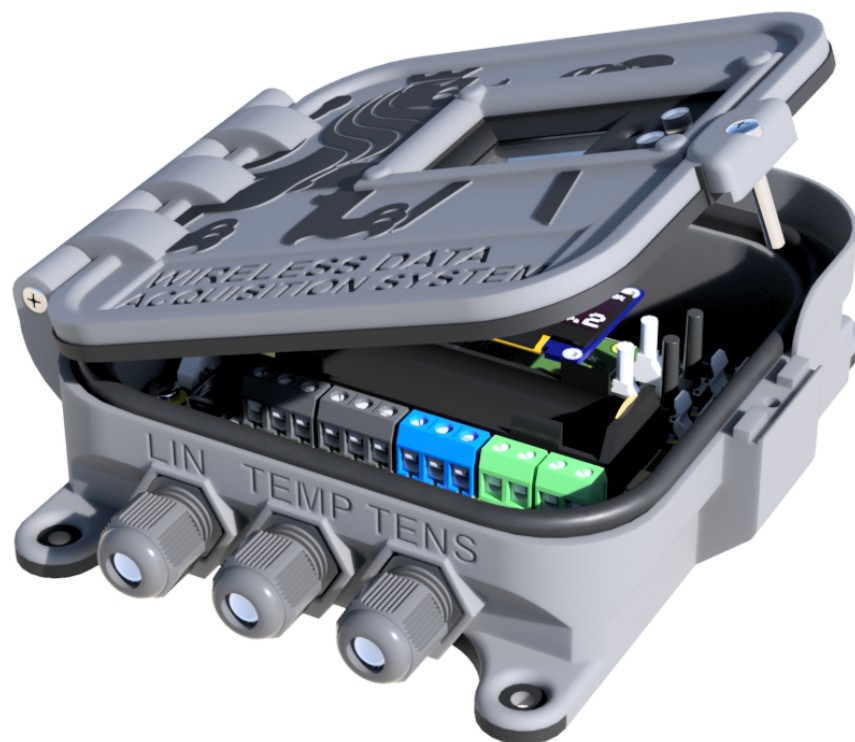
Box je tisknutý pomocí 3D tiskárny z materiálu ABS nebo PET. Box je vymodelován tak, aby měl zvýšenou odolnost vůči vodě. K tomu bylo využito vhodného těsnění a kabelových průchodek. Deformace plastů je nevyhnutelná, proto je žlab pro těsnění vymodelován na základě předešlého testování. Box obsahuje ventily, kde jeden slouží k přísunu venkovního vzduchu a druhý výpustný, který slouží k odtoku případné nahromaděné vody uvnitř boxu. První ventil je umístěn co nejbližší k integrovanému senzoru BME280 v pravé horní části boxu. Druhý ventil je umístěn v dolní části. Na obr. č.7.12 je vlevo ventil první a vpravo ventil druhý.



Obrázek 7.12: Ventily boxu



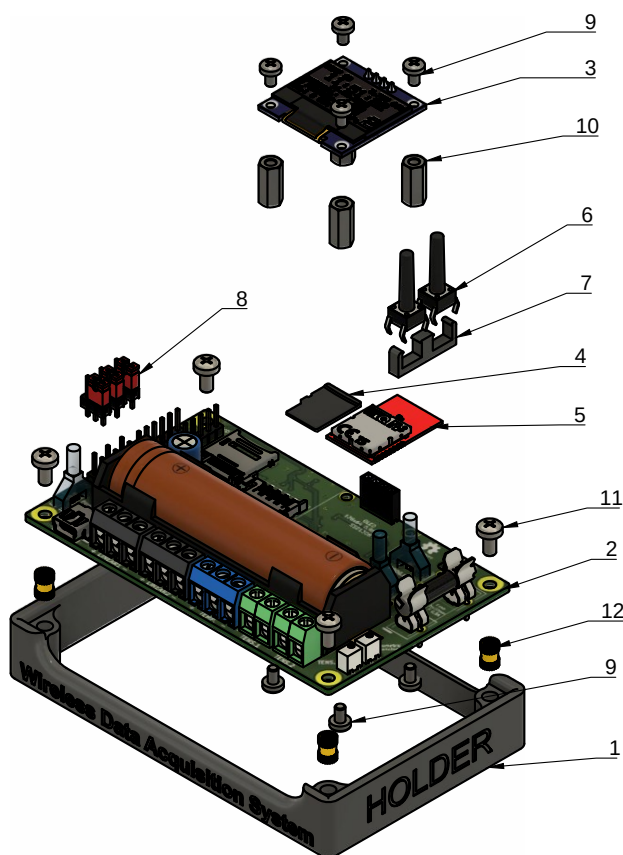
Obrázek 7.13: Výsledný model boxu



Obrázek 7.14: Výsledný model pootvřeného boxu

### 7.5.1 Holder DPS

Tato podkapitola slouží k ujasnění, jak je DPS poskládaná a jaké díly jsou k realizaci potřebné. Na začátku kapitoly je uvedena výsledná osazená DPS 7.1 umístěná v rámečku, který slouží jen pro snadnější manipulaci při pájení, oživování či programování.



Obrázek 7.15: Rozklad DPS - rámeček

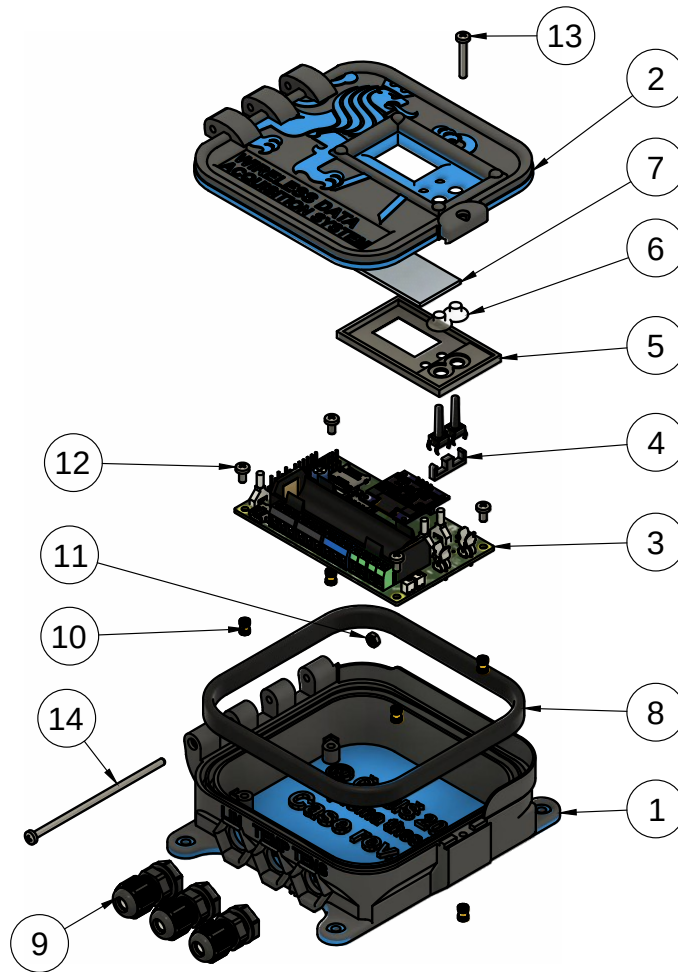
Seznam dílů

Položka	Počet	Název	Popis	Materiál
1	1	3D tisk holder	Vytisklý 3D model ( <i>Holder.stl</i> )	PETG/ABS
2	1	DPS	Osazená deska plošných spojů	FR4
3	1	OLED Display		-
4	1	Micro SD Card	Paměťová karta	-
5	1	IQRF Module	IQRF Modul TR-72D	-
6	2	SW push H19mm	Tlačítka o výšce 19mm	-
7	1	3D tisk zvýšení tlačítek	Vytisklý 3D model ( <i>Zvýšení_SW_2mm.stl</i> )	PETG/ABS
8	3	Jumper propojka	Propojky	-
9	8	M2,5 6mm	Šrouby k uchycení displaye	Ocel
10	4	4x M2,5 H11mm	Distanční sloupek k uchycení displaye	Ocel
11	4	4x M3 6mm	Šrouby k uchycení DPS	Ocel
12	4	4x M3 Insert Nuts	M3 5mm Maticová vložka ( <i>Nýtovací matice</i> )	Mosaz

Tabulka 7.1: Seznam základních dílů a prvků



## 7.5.2 Výsledný box



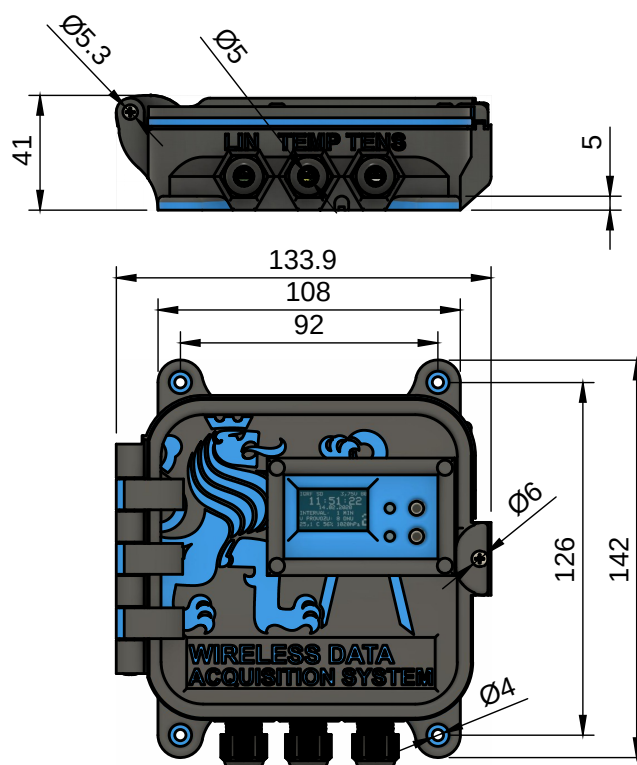
Obrázek 7.16: Rozklad boxu

Seznam dílů

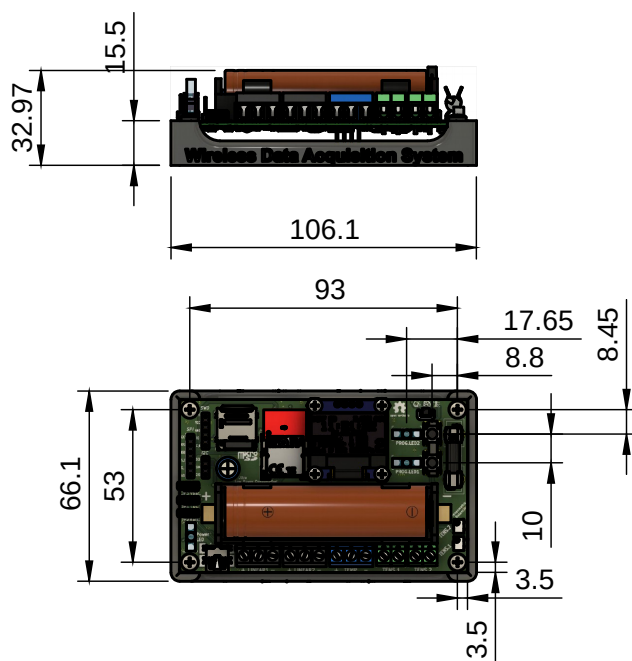
Položka	Počet	Název	Popis	Materiál
1	1	Spodní díl boxu	Vytisklý 3D model ( <i>Bottom.stl</i> )	PETG/ABS
2	1	Horní díl boxu	Vytisklý 3D model ( <i>Top.stl</i> )	PETG/ABS
3	1	DPS	Osazená DPS	FR4
4	1	Díl pro zvýšení SW	Vytisklý 3D model ( <i>Zvyseni_SW_2mm.stl</i> )	PETG/ABS
5	1	Díl pro uchycení plexiskla	Vytisklý 3D model ( <i>Plexi_holder.stl</i> )	PETG/ABS
6	2	Tlačítko	Kulaté silikonové tlačítko čiré (5mm)	Silikon
7	1	Plexisklo	Plexisklo (43 x 33 x 2 mm)	PMMA
8	1	Těsnění	Profil pryžový, 10x4/1,5mm, tvar U	EPDM
9	3	Kabelová vývodka	M12x1,25mm, nylon, černá AG-12D	Nylon
10	5	M3 Insert nuts	M3 5mm Maticová vložka ( <i>Nýtovací matice</i> )	Mosaz
11	1	M3 Matka	M3 Matka	Ocel
12	4	M3x06	Šroub k uchycení DPS	Ocel
13	1	M3x20	Hlavní povolovací šroub	Ocel
14	1	M3x80	Šroub k pantu	Ocel

Tabulka 7.2: Seznam dílů pro BOX

### 7.5.3 Rozměry



Obrázek 7.17: Rozměry boxu



Obrázek 7.18: Rozměry holderu

## 7.6 Spotřeba a testování

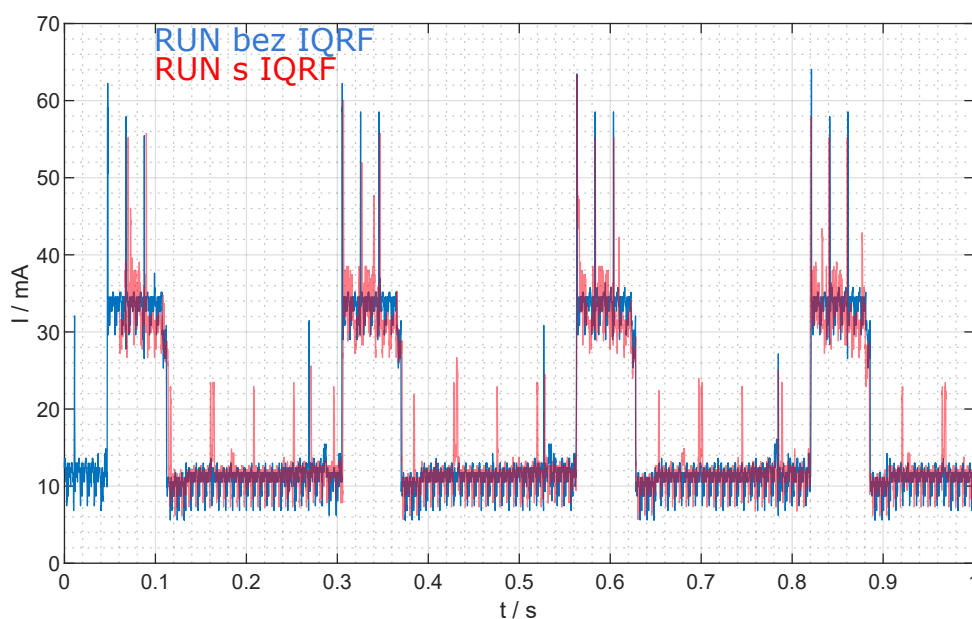
Spotřeba se závisí na počtu připojených senzorů a nastaveného intervalu měření. Největší odběr má displej, který odebírá při rozsvícených 90 % pixelů přibližně 30 mA.

Měření spotřeby probíhalo pomocí snímacího odporu a digitálního osciloskopu. Snímací odpor s hodnotou  $13 \Omega$  byl připojen místo propojky JP1. Na osciloskop se zaznamenával průběh napětí, který byl exportován do csv souboru. Naměřená data byly zpracována pomocí programu Matlab, ze kterého byly určeny hodnoty uvedené v tab.č. 7.3. Hodnota snímacího odporu byla ověřena čtyř-svorkovou metodou, která potvrdila udávanou přesnost 1 %.

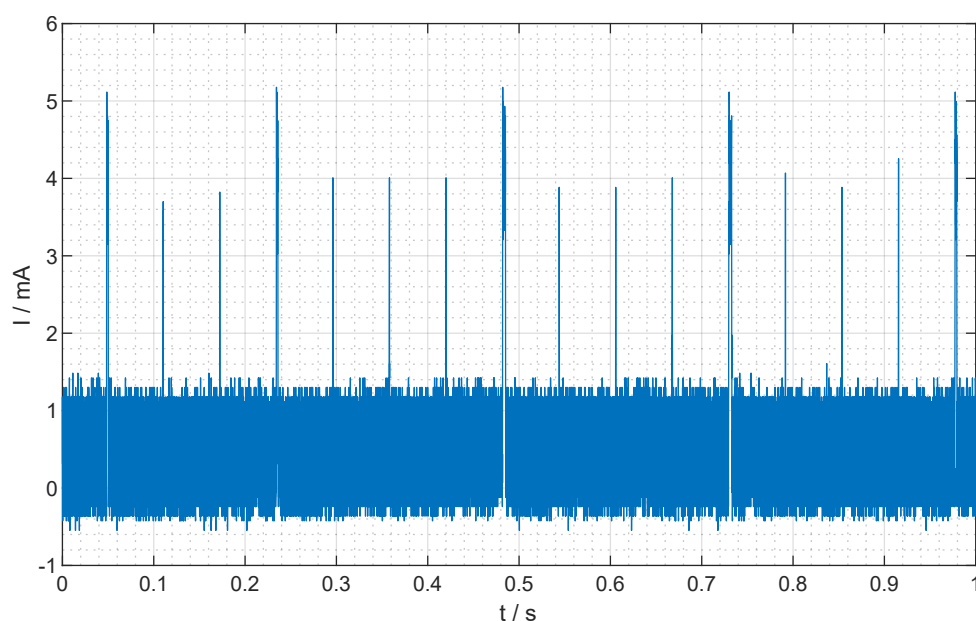
Mód	$I_{stř} / \text{mA}$
RUN ( bez IQRF)	16,86
RUN ( s IQRF)	17,95
SLEEP (bez IQRF)	0,51

Tabulka 7.3: Porovnání spotřeby zařízení

Hodnoty z tabulky 7.3 byly spočteny z celkového zaznamenaného signálu, který měl délku 12 sekund, přičemž bylo potřeba zpracovat 12 milion vzorků. Ukázka naměřených signálů je na obr.č. 7.19 a 7.20. Měření RUN módu probíhalo když byl zapnutý displej a MCU měřil hodnoty ze senzorů. Spotřeba SLEEP módu byla měřena v době mezi nastaveným intervalem měření.



Obrázek 7.19: Spotřeba zařízení v RUN módu

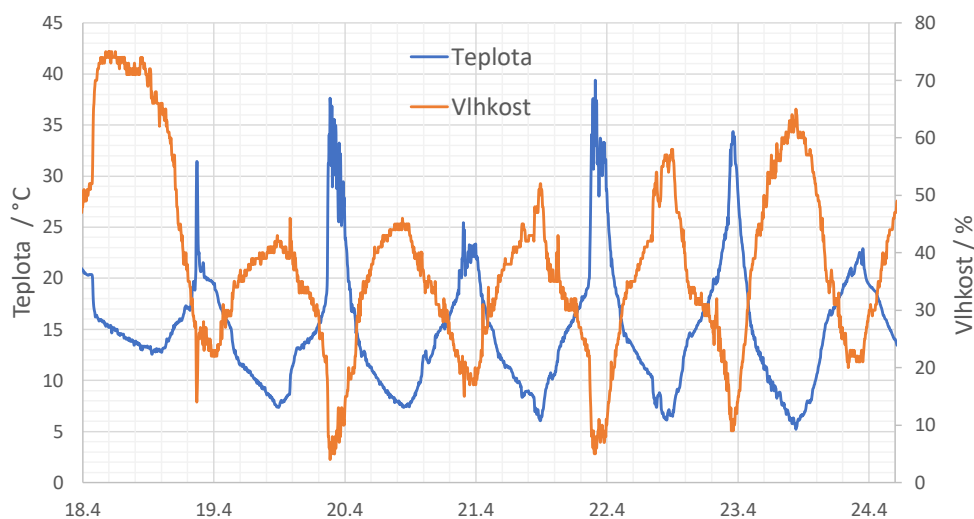


**Obrázek 7.20:** Spotřeba zařízení ve SLEEP módu bez IQRF

Při použití baterie s kapacitou 3 000 mAh by měla jednotka vydržet přibližně 245 dní, pokud by byla pouze ve SLEEP módu.

Na následujících grafech jsou vidět průběhy, které vznikly z naměřených dat poskytnutých jednotkou. Naměřená data byla exportována do Microsoft Excel, ve kterém byla upravována. Jednotka byla umístěna venku a v náhodných časech docházelo k uživatelské interakci.

Graf na obr.č. 7.21 zobrazuje závislost teploty a vlhkosti v čase. Tyto hodnoty byly naměřeny pomocí integrovaného senzoru BME280.



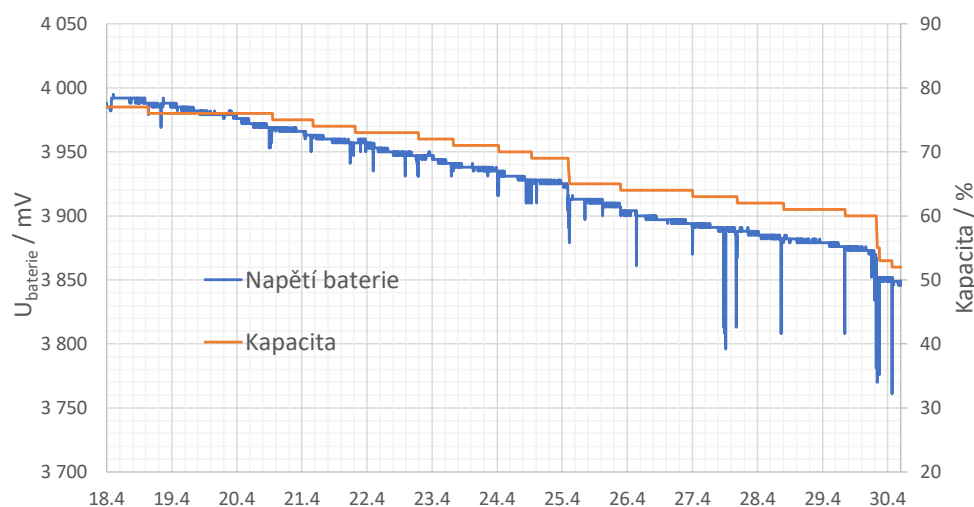
**Obrázek 7.21:** Závislost teploty a vlhkosti na čase z BME280

Graf na obr.č. 7.22 zobrazuje závislost napětí a kapacity baterie v čase. Tyto hodnoty byly naměřeny pomocí integrovaného obvodu fuel gauge. Z grafu

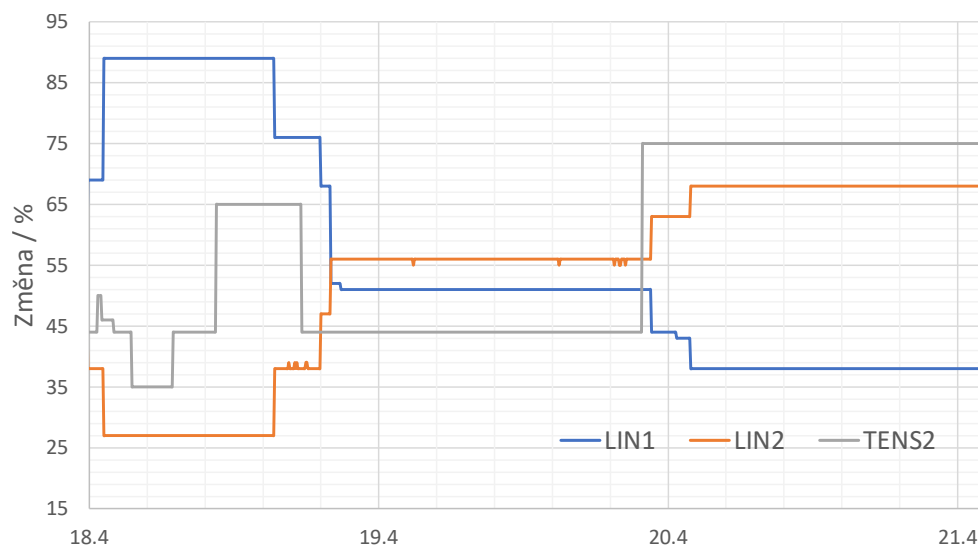
jsou vidět skokové poklesy napětí vždy při uživatelské interakci. Další faktor, který ovlivňuje měření, je napájecí část displeje, která není odfiltrována.

Třetí graf 7.23 simuluje měřené změny z lineárních potenciometrů a z jednoho tenzometru. Průběh není ničím zvláštní, jen zobrazuje změnu, která byla vytvořena buď připojeným potenciometrem nebo změnou odporu tenzometru.

V tabulce č. 7.4 je ukázka naměřených dat. Z důvodu čitelnosti je rozdělena do více částí.



**Obrázek 7.22:** Závislost napětí a kapacity baterie na čase



**Obrázek 7.23:** Závislost připojených senzorů LIN1, LIN2 a TENS2 na čase

-----SETUP-----			-----RTC-----		-----BME280-----			-----Dallas-----	
Unit.	Int. [s]	Gain [x]	Time	Date	Temp. [°C]	Hum. [%]	Press. [hPa]	Conn.	Temp. [°C]
1	60	13	####	####	23	35	970.0	0	NC
1	60	13	####	####	22,7	41	970.0	0	NC
1	60	13	####	####	22,8	31	970.0	0	NC

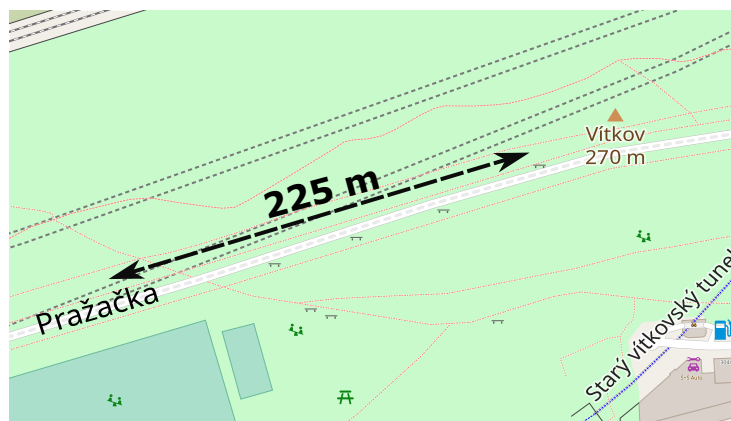
  

-----Linear-----			-----Tensometric-----			-----Battery-----		
Conn.	LIN1	LIN2	Conn.	TENS1 [%]	TENS2 [%]	Day	Percent [%]	Voltage [mV]
0	67	37	0	NC	42	2	78	3998
0	87	26	0	NC	40	2	77	3988
0	87	37	0	NC	35	2	77	3998

**Tabulka 7.4:** Ukázka naměřených dat z jednotky

Testování maximální vzdálenosti probíhající komunikace mezi IQRF moduly probíhalo v Praze na Vítkově. Jednotky byly 2 metry na zemi, vertikálně natočené směrem k sobě a byly na přímou viditelnost. IQRF moduly byly nakonfigurované na maximální vysílací výkon, kde byl nahrán low power plugin do noda.

Z testovacího měření vyšla přibližná maximální vzdálenost pro komunikaci mezi koordinátorem a nodem asi 225 m. Při testování bylo zjištěno, že IQRF nedokáže navázat komunikaci, pokud je jeden z IQRF modulů v pohybu. Měření tedy probíhalo tak, že koordinátor byl v neměnné pozici a node se vždy přesunul o 10 m, kde se po každém přesunu zastavil a otestovalo se přijetí odpovědi na straně koordinátora. Dále bylo zjištěno, že hraje velkou roli umístění IQRF modulu, pokud byl modul umístěn horizontálně, komunikace nepřesáhla vzdálenost ani 50 m. Na obr.č. 7.24 je uvedena mapa, kde je vidět přesný úsek měření. Na trase měření byla po stranách zeleň, která přímo nezasahovala do viditelné vzdálenosti.



**Obrázek 7.24:** Dosah IQRF na přímou viditelnost

Testování komunikace v zástavbě je ovlivněno především tloušťkou zdí a použitého konstrukčního materiálu. Z testování komunikace ve starších budovách vyšla vzdálenost přibližně 50 m, kdy bylo možné navázat spojení. Testování probíhalo na stejném patře budovy a obě jednotky byly vertikálně natočené.

# Kapitola 8

## Návody a postupy

V této kapitole je detailně popsána uživatelská obsluha a také postup, který se při realizaci výsledného zařízení osvědčil nejlépe.

### 8.1 Obsluha zařízení

Pro používání zařízení musí být vložena Li-ion baterie 18650 a pojistka 5x20 mm 500 mA. Propojky JP1, JP2 a JP3 musí být zkratovány. Názorně uvedeno na obr.č. 7.6 bod 6 a 14. Propojkou JP1 lze odpojit hlavní zdroj energie, tedy baterii.

Pokud systém projde počáteční inicializací, výchozí hodnoty se nastaví takto: **Unit Numb.** – 1. **Interval** – 60s. **TEN.Gain** – 13x. **Sleep** – 10s.

K interakci slouží dvě uživatelská tlačítka a dvě indikační červené LED. Horní tlačítko je tzv. přepínací/potvrzovací a dolní tzv. rozbalovací/měnicí. Menu systém je popsán v kapitole uživatelské rozhraní 7.3.

Nastavení jednotky lze provádět manuálně, nebo bezdrátově pomocí technologie IQRF, za předpokladu, je-li IQRF modul osazený.

Velikost microSD karty je doporučena maximálně 8 GB a s formátem FAT. Pro vkládání a odebrání karty je nutné použít uživatelské menu, kde se manuálně přidá nebo odebere. Pokud je karta správně vložena, na hlavní obrazovce se objeví v levém horním rohu zkratka SD 7.9.

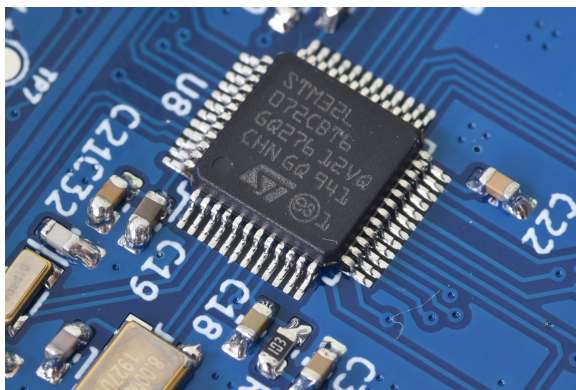
Jednotka měří vždy všechny hodnoty ze senzorů nehledě na to, jestli je daný senzor připojen. Pokud je senzor nepřipojen, zobrazí se 0, což znamená nepřipojeno, nebo mimo rozsah. Pracovní rozsah pro lineární potenciometry a tenzometry je 5 % až 100 %.

Pro správné měření tenzometrů je nutné vyvážit můstek, k tomu slouží příslušné více-otáčkové potenciometry umístěné na přední straně. Názorně zobrazeno v kapitole DPS -> finální verze 7.1.2 na obr.č. 7.6 bod 5. Po připojení tenzometru je nutné můstek vyvážit a to tak, že hodnota TENSx bude zobrazovat hodnotu kolem 50 %. Tenzometr musí mít jmenovitý odpor 120 Ω, pokud by byl požadavek na jinou hodnotu odporu tenzometru, musel by se zaměnit odpor R1 nebo R5 na zadní straně DPS.

Pokud nastane stav, kdy je nutné zařízení restartovat, je nutné zkratovat NRST SWD pin s libovolným pinem GND. Po tomto zásahu systém projde počáteční inicializací.

## 8.2 Osazování & ožívování

Jako nejspolehlivější postup při osazování a ožívování uvádím následující kroky, které eliminují strávený čas u hledání chyb.



**Obrázek 8.1:** Osazený mikrokontrolér na desce plošných spojů

1. Nejprve začít osazovat napájecí část. Bloky: USB connector + protection, Battery charger a Battery protection. Vyzkoušet nabíječku baterie.
  2. Dále osadit a změřit funkčnost LDO.
  3. Osadit Blok MCU, 2x Blok Switch Debouncing, Blok LED, Blok programming connector a Blok VBAT system. Nutné osadit a zkratovat jumpery JP1, JP2 a JP3.
  4. Osadit pinHeader SWD a otestovat, že se k MCU dá připojit a komunikovat pomocí STM32 ST-LINK Utility. Po otestování nahrajeme testovací program `Ozivovani_testSW` a rozsvítíme LED pomocí tlačítek SW1 a SW2. (*\*V ST-LINK musí být nastaveno SWD a Software System Reset*). Pokud by se nedařilo MCU připojit, může se ještě vyzkoušet **Connect under reset**, který se provede ručně.
    - a. Reset pin SWD uzemněný
    - b. Připojit programátor ST-Link V2
    - c. Zapnout STM32 ST-LINK Utility
    - d. Nastavit v programu Connect under reset a Hardware reset
    - e. Hned po kliknutí na OK fyzicky odpojit reset pin SWD
- Tímto způsobem lze MCU připojit, i když by se přemapovaly SWD GPIO, nebo kdyby byl MCU v nějakém low power módu.
5. Osadit Blok OLED, blok PULL UP a vyzkoušet výpis (*\*Na displeji by se měl zobrazovat čas*).



6. Osadit power management – všechny PMOS, NMOS tranzistory + svorkovnice a zjistit pomocí Atollic TrueSTUDIO, jestli DRIVE funguje. V programu postupně povolovat DRIVE a testovat.
7. Otestovat ADC LINEAR a 1Wire. Připojit na svorkovnice LIN1, LIN2 potenciometry, dále na Temp. teplotní čidlo Dallas a vyzkoušet výpis na display.
8. Osadit obvod pro monitorování stavu baterie FUEL GAUGE a vyzkoušet komunikaci na OLED displeji. (*\*Pokud nebude zobrazované napětí baterie odpovídat reálné hodnotě napětí baterie, je možné, že vložená pojistka má velký odpor.\**)
9. Osadit integrované čidlo BME280 a otestovat komunikaci na OLED displeji.
10. Osadit blok Tensometric senzor, ale vynechá se IC5. Na TP5 a TP6 se přiletuje odpor 10K. Otestuje se funkčnost, tzn. potenciometrem RV1 se nastaví na svorkovnici J6 cca 1,4 V a na RV2 na J4 cca 1,5 V. Vyzkouší se, že funguje switch, tzn. na TP1 se změří obě napětí po přepnutí. Na TP8 se změří polovina napájecího napětí. V posledním kroku se na TP4 měří polovina napájecího napětí  $\pm$  zesílený rozdíl napětí z můstku. Zesílení je nastaveno na cca 13x, tzn. pokud je na pinech IC2 1 a 4 10 mV, na TP4 musí být  $1,4 + 0,130 = 1,53$  V. Po otestování přiletovat IC5 a obdobně vyzkoušet.
11. Osadit zbylé konektory, ochrany a DPS vyčistit. Ochranu D10 neosazovat.
12. K debugování sběrnic lze využít vyvedených pin headerů na přední straně DPS. K tomu doporučuji nejlevnější řešení v podobě USB logického analyzátoru s dostupným softwarem Logic Analyzers from Saleae. Debugování komunikací pomocí osciloskopu doporučuji jen tehdy, když je potřeba zkoumat přesný průběh signálu. Další výhodou u osciloskopu je ta, že můžeme připojit vhodně navržený odporový dělič na zkoumaný vodič a vyvodit tak to, jaké zařízení zrovna vysílá. Například jestli slave odpovídá. Ukázka je vidět na obr.č. 8.2, kde se zkoumalo, jestli zařízení na sběrnici I<sup>2</sup>C odpovídá ACK.

Obrázek 8.2: Debugování sběrnice I<sup>2</sup>C

## 8.3 3D tisk & kompletace boxu

Doporučené nastavení tiskárny:

- **materiál** – PETG/ABS (Pro ABS nutná úprava měřítka na 100,5 %),
- **výška vrstvy** – 0,15 mm, **perimetry** - 3, **výplň** - minimálně 45 %, **podpory/raft/brin** - ne,
- **celková spotřeba materiálu** – 150 g, 58 metrů,
- **čas tisku** – 18 h 40 min,
- **výměna filamentu** – ve výšce 3,8 mm. Pro modely Bottom.stl i Top.stl. Pro Top.stl pak výměna ještě ve výškách 5,2 mm a 5,6 mm.

Pro dosažení nejlepšího vizuálního dojmu jsem využil tzv. post-processingu. Pro tisk z materiálu ABS lze vytisknuté díly rozpouštět například v acetonu. Postup, který se mi osvědčil, je následující:

1. Po vytisknutí dílu spálíme horkovzdušnou pistolí (cca 200 °C) nitky, které mohou při tisku vzniknout.
2. Nahřejeme nýtovací vložky ruční pájkou a vmáčkneme je do děr, přičemž necháme šrouby v závitech.
3. Model rozpustíme v acetonových výparech za pomoci 3D tiskárny podle následujících kroků:
  - a. Model umístíme na alobal, který bude po okraji zahnutý, aby se okraje dílu nenaleptaly a nepřichytily k alobalu.
  - b. Do uzavratelné nádoby nalijeme cca 50 ml acetonu, teplota podložky nastavíme na 90 °C a přibližně na 15 až 25 minut uzavřeme. Při leptání je nutné kontrolovat aktuální stav. **Při práci s acetonem je nutná vysoká opatrnost.** Aceton je vysoce hořlavý a rychle se vypařuje. Doporučuji práci v rukavicích a s ochrannými brýlemi.
  - c. Nádobu otevřeme ve větraném prostoru. Výpary se mohou velice snadno zapálit. Po otevření necháme nádobu přibližně 5 minut otevřenou, aby nedošlo při manipulaci k otiskům na dílu.
  - d. Po 5 minutách lze snadno alobal odebrat, ale je nutné opatrné manipulace s dílem, abychom na něm nezanechali stopy.
  - e. V tomto stavu necháme díl minimálně 2 dny, aby se veškerý aceton vypařil. Poté lze model přestříkat bezbarvým lakem. Lak nechat schnout dle doporučení od výrobce, ale většinou přibližně 5 dní bude dostačující.
4. Horní díl Top.stl je potřeba složit z dílů Plexi\_holder.stl, plexiskla s rozměry 43 x 33 x 2 mm a kulatého silikonového tlačítka 5mm. Všechny tyto díly jsou znázorněny v rozpadu 7.16, kde je uvedena tabulka potřebných dílů 7.5.2.

- a. Nejprve se lihem odmastí všechny plochy.
  - b. Nanese se průhledný silikon mezi díly, přičemž vymáčknutý silikon se neočisťuje, odřízne se až po ztuhnutí. Zatížit lepený díl.
  - c. Odříznutí přebytečného silikonu a vyčištění lihem.
5. Dolní díl Bottom.stl se doplní o průchodky (*M12x1,25mm, nylon, černá AG-12D*) a vloží se těsnění (*profil pryžový, 10x4/1,5mm, tvar U*) do žlabu.
  6. Horní díl Top.stl a dolní díl Bottom.stl jsou k sobě připevněny pomocí pantu, který je realizován M3 x 80 šroubem a zapuštěnou M3 matkou.



**Obrázek 8.3:** Ukázka výsledné úpravy vytisknutého dílu



## Kapitola 9

### Cenová kalkulace

Celková cena je kalkulována na jeden výsledný produkt bez externích senzorů. Součástky byly kupovány v TME.cz, Farnell.cz či cz.Mouser.com podle dostupnosti. Reálná výsledná cena se mění podle počtu požadovaných osazených DPS, jelikož se některé součástky musejí objednávat v minimálním prodejním množství, pasivní SMD součástky většinou po 100 kusech, integrované obvody po třech apod. Výroba DPS u JLCPCB.com vyšla celkově na 28\$, kde se z této ceny připlatilo za rychlé dodání a činilo tak 23 \$. Celkem 10 kusů DPS 60 x 100 mm vyšlo v přepočtu přibližně na 700 Kč. Nejvíce nákladnou položkou je čas práce, která v kalkulaci zahrnutá není, proto je cenová kalkulace spíše orientační.

	cena s DPH
<b>Součásty</b>	1 710 Kč
<b>Výroba DPS</b>	70 Kč
<b>IQRF modul</b>	500 Kč
<b>Micro SD karta</b>	100 Kč
<b>Box - 3D tisk + díly</b>	150 Kč
<b>Cena celkem:</b>	2 530 Kč

**Tabulka 9.1:** Výsledná kalkulace za jeden kus

Z uvedené tabulky č. 9 vyšla přibližná cena 2 530 Kč. V položce součástky jsou zahrnuty všechny integrované obvody, pasivní součástky, polovodiče, konektory a všechny jiné komponenty potřebné pro osazení DPS, jako například baterie, pojistka, distanční sloupky a světlovody. Detail kalkulace součástek je uveden v příloze D.

Položka výroba DPS zahrnuje cenu výroby desky s poštovním za jeden kus.

Pod položkou Box – 3D tisk + díly jsou zahrnuty veškeré náklady spojené s 3D tiskem (*materiál, spotřeba energie, aceton a lak*) spolu se všemi potřebnými díly k realizaci boxu (*nýtovací vložky, těsnění, kabelové průchodky a spojovací materiál*)



# Kapitola 10

## Závěr

Úkolem práce bylo navrhnout a realizovat bezdrátový systém sběru dat, kde jednotlivé bezdrátové jednotky mají digitální rozhraní pro připojení teploměru a analogové rozhraní pro měření lineárních potenciometrů a tenzometrů. Jednotky jsou určeny pro monitorování stavebních objektů, kde se sledují především projevy trhlin a poměrné deformace.

Výsledné zařízení je energeticky nenáročné, snadno ovladatelné a odolnější pro venkovní použití. Jednotka obsahuje celkem 5 svorkovnic pro připojení senzorů, ze kterých jsou dvě určeny pro potenciometrické senzory polohy, dvě pro fóliové tenzometry a jeden pro digitální teploměr Dallas DS18B20. Jednotka je doplněna o kombinovaný digitální senzor BME280 pro měření teploty, vlhkosti a barometrického tlaku. Dále jednotka obsahuje uživatelské rozhraní, kde je možné manuálního nastavení a zkontrolování aktuálního stavu měřených hodnot. Měřené hodnoty mohou být ukládány lokálně na microSD kartu, nebo mohou být poskytovány bezdrátově. Nastavení lze provádět manuálně, nebo bezdrátově pomocí IQRF modulu.

Pro umístění výsledné DPS bylo využito 3D tisku, kde byl navržen box, který je vhodně doplněn o těsnění. Box obsahuje ventil pro přísun vzduchu a ventil pro odtok případně nahromaděné vody. Otevření boxu se provádí pomocí jednoho hlavního šroubku M3. Celkové rozměry jednotky jsou (šířka x výška x hloubka ) 134 x 41 x 142 mm.

V průběhu práce se zhotovily celkem tři verze DPS. První verze obsahovala řadu chyb, které bylo nutné opravit. Hlavní rozdíl mezi výslednou a první verzí je způsob napájení zařízení a v úpravě tenzometrické části.

Testování probíhalo 3 týdny, kdy se simulovaly připojené senzory pomocí změn potenciometrů, nebo zatížení tenzometru. Z naměřených dat byly vytvořeny ukázkové grafy. Spotřeba systému se pohybuje ve SLEEP módu kolem hodnoty 0,51 mA a v RUN módu s připojeným IQRF modulem 17,95 mA. Maximální vzdálenost pro komunikaci mezi koordinátorem a nodem vyšla přibližně 225 m na přímou viditelnost a v zástavbě vyšla přibližně 50 m.

Centrální jednotka může být realizována pomocí PC, kde se připojí GW-USB-05, přičemž dojde k obsluze pomocí IQRF IDE, nebo pomocí jiného menšího jednodeskového počítače, jako například Raspberry Pi. K Raspberry Pi je možné připojit také GW-USB-05 nebo je možné využít patičku připojenou po sběrnici SPI.

Vylepšení do budoucna může představovat doplnění jiné bezdrátové technologie, zvýšení počtu baterií nebo svorkovnic pro externí senzory a především doplnění o možnost napájení ze solárního panelu, nebo jiných zdrojů energie. V uživatelské části centrální jednotky by mohlo vzniknout prostředí, které bude nahrazovat obsluhu zprostředkovanou rozhraním IQRF IDE. Pro lokální použití by mohl usnadnit práci s daty script, který by vykreslil všechny grafy.



## Literatura

- [1] Kirschbaum, Adam. *MONITORING ZDĚNÉ BUDOVOY OVLIVNĚNÉ OKOLNÍ VÝSTAVBOU* [online]. BRNO, 2014 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=90413](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=90413). BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. PETR CIKRLE, Ph.D.
- [2] Vlček, Milan. *Poruchy a rekonstrukce staveb. 3. vyd.* Brno: ERA, 2006, vi, 222 s. Technická knihovna (ERA). ISBN 80-736-6073-3.
- [3] Králíková, Monika. *MONITOROVÁNÍ STAVEB V SOUVISLOSTI S OKOLNÍ STAVEBNÍ ČINNOSTÍ* [online]. BRNO, 2013 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=78992](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=78992). DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. PETR CIKRLE, Ph.D.
- [4] Surovec, Jiří. *STATICKÝ POSUDEK: STAVBA BD Zengrova 601, Kolín IV* [online]. In: . červenec 2015, s. 14 [cit. 2020-04-19].
- [5] Gamin. *Pravítko na měření trhlin v betonu Elcometer 143* [online]. In: . [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://www.elcometer.cz/elcometer-143/>
- [6] Růžička, Vlastimil. *Zkoušení a jakost ve stavebnictví* [online]. 19.10.2012 [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/9183-zkouseni-a-jakost-ve-stavebnictvi>
- [7] Ginger CEBTP,. *RŮZNÉ ZPŮSOBY SLEDOVÁNÍ TRHLIN A MĚŘENÍ OTEVŘENÍ TRHLIN* [online]. [cit. 2020-04-20]. Dostupné z <https://www.ginger-cebtp.com/produit/centrale-phenix/les-differents-moyens-de-suivi-de-fissures-et-de-mesure-douverture-de-fissure/>
- [8] Zařízení pro měření. *CK-102* [online]. [cit. 2020-04-20]. Dostupné z <http://cz.tmagneticflowmeter.com/civil-engineering-inspection/concrete-crack-width-measurement/ck-102-concrete-crack-width-measurement.html>

- [9] Zařízení pro měření. *PT-104* [online]. [cit. 2020-04-20]. Dostupné z <https://www.picotech.com/data-logger/pt-104/high-accuracy-temperature-daq>
- [10] Zařízení pro měření. *TC-200* [online]. [cit. 2020-04-20]. Dostupné z <https://www.innovatest-europe.com/products/portables/concrete-testing/concrete-testing-tc200>
- [11] Zařízení pro měření. *DT90L* [online]. [cit. 2020-04-20]. Dostupné z <http://www.trinstruments.cz/dt90l>
- [12] Zařízení pro měření. *Rissfox Mini* [online]. [cit. 2020-04-20]. [http://www.scantronik.de/English/Produkt\\_Rissfox\\_Mini\\_eng.php](http://www.scantronik.de/English/Produkt_Rissfox_Mini_eng.php)
- [13] Hruška, František. *Senzory: Fyzikální principy, úpravy signálů, praktické použití*. [online]. Druhé, rozšířené. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011 [cit. 2018-04-11]. ISBN 978-80-7454-096-7.
- [14] Husák, Miroslav. *Mikrosenzory a mikroaktuátory*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2008. Gerstner. ISBN 978-80-200-1478-8.[cit. 2018-04-11].
- [15] Fraden, Jacob. *Handbook of modern sensors*. 4th edition. Woodbury: American institut of physics, 2014. ISBN 978-1-4419-6466-3[cit. 2018-04-11].
- [16] Zehmula, K. *Čidla robotů* 1.vyd. Praha: SNTL, 1990. 370s. Automatizace a robotizace. ISBN 80-03-00563-9
- [17] Šipula, Martin. *ZAŘÍZENÍ PRO LINEÁRNÍ ODMĚŘOVÁNÍ POLOHY* [online]. BRNO, 2010 [cit. 2020-04-22]. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. LADISLAV KÁŇA.
- [18] Platil, A., Ripka, P. *Senzory a převodníky* [online]. Praha, 2014 [cit. 2020-04-22]. Laboratorní cvičení. Skripta ČVUT, Praha (dotisk 2006)
- [19] Vojáček, Antonín. *Tenzometrická měření* [online]. BRNO, 2012 [cit. 2020-04-22]. Bakalářská PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. KAMIL PODAN7, Ph.D.
- [20] Vítězslav, Trojan. *Odporové tenzometry - princip, provedení, použití, historie* [online]. 19. Březen 2017 [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/foliove-odporove-tenzometry-princip-provedeni-pouziti-historie.html>
- [21] Kříž, Jan. *Tenzometrické měření náprav závodního vozu* [online]. Praha, 2014 [cit. 2020-04-22]. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Jan Sobotka.
- [22] Buben, Dominik. *WI-FI SENZOR TEPLoty* [online]. 2016 [cit. 2020-04-23]. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Martin Šimůnek.

- [23] Zdeněk, Bečvář. *Wireless technologies Introduction and fundamentals* [online]. [cit. 2020-04-23]. [online]. Přednášky B2M32BTSA – Wireless Technologies
- [24] Středa, Jakub. *KOMUNIKACE AUTONOMNÍCH MOBILNÍCH ROBOTŮ A NAVIGAČNÍCH BODŮ* [online]. [cit. 2020-04-23]. [online]. BRNO, 2017 [cit. 2020-04-24]. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. Daniel Zuth, Ph.D.
- [25] Nilsson, Rolf. Komunikační systémy: Bluetooth Low Energy není jen nová verze standardu Bluetooth. *AUTOMA* [online]. 2013 [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: [https://www.automa.cz/cz/casopis-clanky/bluetooth-low-energy-neni-jen-nova-verze-standardu-bluetooth-2013\\_12\\_0\\_10907/](https://www.automa.cz/cz/casopis-clanky/bluetooth-low-energy-neni-jen-nova-verze-standardu-bluetooth-2013_12_0_10907/)
- [26] Kestřánek, Tomáš. *IoT technologie pro automatizaci domácnosti* [online]. Praha, 2019 [cit. 2020-04-24]. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.
- [27] Karel, Setnička. *Systém ražení pro orientační běh v síti LoRa se strojovou inteligencí* [online]. Praha, 2019 [cit. 2020-04-24]. DIPLOMOVÁ PRÁCE. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Adam Bouřa, Ph.D.
- [28] Krupka, Lukáš. *Problematika koexistence LPWAN/LPN technologií v prostředí IoT* [online]. Praha, 2016 [cit. 2020-04-24]. DIPLOMOVÁ PRÁCE. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Lukáš Vojtěch, Ph.D.
- [29] Brzobohatý, Tomáš. *MĚŘENÍ TEPLoty* [online]. BRNO, 210n. l. [cit. 2020-04-23]. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. KAMIL PODANÝ, Ph.D.
- [30] Lineární potenciometrický snímač v pouzdře z Duroplastu. In: . *MEGATRON* [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://www.megatron.cz/mm10-mmr10>
- [31] HBM 1-LY11-10/120 Strain gauge for ferritic steel. *NS Market* [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: [https://www.nsmarket.gr/en/index/products/HBM\\_SrainGauges?row=851](https://www.nsmarket.gr/en/index/products/HBM_SrainGauges?row=851)
- [32] Teploměr vodotěsný - sonda 2m DS18B20 *Arduino-shop* [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://arduino-shop.cz>
- [33] Mielke, Matt. *Low-Power Modes on the STM32L0 Series* [online]. Apr 11, 2019 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://www.digikey.com/eewiki/display/microcontroller/Low-Power+Modes+on+the+STM32L0+Series>
- [34] ST *STM32 Ultra Low Power MCUs* [online]. [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-ultra-low-power-mcus.html>

- [35] Vomočil, Jan. *Výukový přípravek pro měření sériových sběrnic mikrokontroléru* [online]. Praha, 2018 [cit. 2020-04-27]. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Tomáš Teplý.
- [36] Vladimír, Čebiš. *Automatický systém pro pěstování rostlin* [online]. Praha, 2018 [cit. 2020-04-27]. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Tomáš Teplý.
- [37] 2019 Maxim Integrated Products, Inc *Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer: DS18B20* [online]. [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
- [38] Analog Devices *Wide Supply Range, Rail-to-Rail Output Instrumentation Amplifier AD8226* [online]. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/AD8226.pdf>
- [39] Analog Devices *Wide Supply Range, Rail-to-Rail Output Instrumentation Amplifier AD8227* [online]. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/AD8227.pdf>
- [40] Jakub, Středa. *Analog Devices: Wide Supply Range, Rail-to-Rail Output Instrumentation Amplifier AD8226* [online]. Praha, 2018 [cit. 2020-04-27]. DIPLOMOVÁ PRÁCE. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Daniel Zuth, Ph.D
- [41] Jan, Velička. *Měřicí a vizualizační systém pro měření environmentálních veličin s využitím technologie IQRF* [online]. Ostrava, 2018 [cit. 2020-04-27]. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Martin Pieš, Ph.D.
- [42] IQRF. *Data Sheet RF Transceiver Module Series: TR-72D* [online]. [cit. 2020-04-30]. Dostupné z: [https://static.iqrf.org/Datasheet\\_TR-72D\\_191209.pdf](https://static.iqrf.org/Datasheet_TR-72D_191209.pdf)
- [43] NA3D. *Přehled dostupných materiálů* [online]. [cit. 2020-04-30]. Dostupné z: <https://www.na3d.cz/blog/prehled-dostupnych-materialu>
- [44] Kratochvíl, Tomáš. *3D FDM TISKÁRNA REPRAP A PARAMETRY TISKU* [online]. BRNO, 2015 [cit. 2020-04-30]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/39819/final-thesis.pdf?sequence=8&isAllowed=y>. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. OSKAR ZEMČÍK, Ph.D.

# Příloha A

## Seznam zkratek

Zkratka	Celý název
ADC	Analog to digital converter
ARM	Advanced RISC Machine
ASIC	Application Specific Integrated Circuit - <i>zákaznický integrovaný obvod</i>
CCD	Charge-coupled device
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor
CS	Chip select
ČSN	Československá státní norma
DPS	Deska plošných spojů
EMC	Electromagnetic compatibility
ESD	Electrostatic discharge
GSM	Global system for mobile communications
I <sup>2</sup> C	Inter-Integrated Circuit
I <sup>2</sup> S	Inter-IC Sound
IP <sub>xx</sub>	International Protection Marking- <i>stupeň krytí</i>
LDO	Low-dropout regulator
LED	Light-Emitting Diode- <i>elektroluminiscenční dioda</i>
MCU	Microcontroller unit <i>mikrokontrolér</i>
MEMS	MicroElectroMechanical Systems
MISO	Master In-Slave Out - <i>Master Vstup, Slave výstup</i>
MOSI	Master Out-Slave In - <i>Master výstup, Slave vstup</i>
OLED	Organic light-emitting diode
OS	Operating system
PLC	Programmable logic controller
RTC	Real-Time Clock - <i>hodiny reálného času</i>
Rx	Receive Data
SCL	Serial Clock - <i>hodinový signál</i>
SDA	Serial Data - <i>datový kanál</i>
SPI	Serial Peripheral Interface
Tx	Transmit Data
UART	Universal Asynchronous serial Receiver and Transmitter
USB	Universal serial bus



## Příloha B

### Použitý software a přístroje

#### B.1 Software

Většina použitého softwaru s výjimkou kancelářského balíčku Office je volně šiřitelný. U Fusion 360 je využita studentská licence.

- KiCAD 5.1.5 - *návrh desek plošných spojů*
- Atollic TrueSTUDIO for STM32 9.3.0 - *programování MCU Arm®*
- STM32CubeMX 5.5.0 - *konfigurace a generování inicializačního kódu MCU*
- STM32 ST-LINK Utility 4.5.0.0 - *softwarové rozhraní pro programování mikrokontrolérů STM32*
- Logic 1.2.18 from Saleae - *debugování sběrnic*
- IQRF IDE4 4.56 - *vývojové a servisní prostředí pro IQRF*
- Autodesk Fusion 360 - *3D modelování, technické výkresy a render*
- Slic3r Prusa Edition - *příprava tiskových dat pro tiskárny Prusa Research*
- Inkscape - *úprava fotek a obrázků*
- TeXstudio - *tvorba a správa LaTeX dokumentů*
- App.diagrams.net - *tvorba blokových schémat a vývojových diagramů*
- Office 365 - Excel - *kancelářský balíček*

## ■ B.2 Přístroje

Za možnost využití měřicích přístrojů a realizaci 3D tisku vděčím SPŠE Ječné.

- Agilent 3458A - 8 1/2 digit - *digitální multimetr*
- Agilent 34410A - *digitální multimetr*
- Hewlett Packard 34401A - *digitální multimetr*
- RIGOL MSO2202A - *digitální osciloskop*
- Diametral P230R51D - *DC laboratorní zdroj*
- Fluke TiS20 - *termokamera*
- Prusa i3 mk2 - *3D tiskárna*

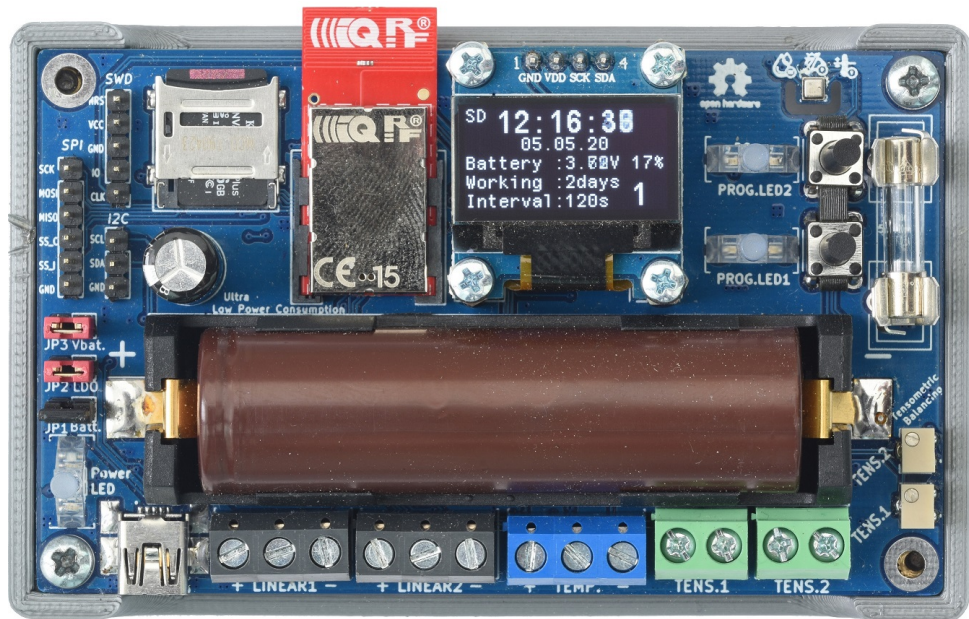
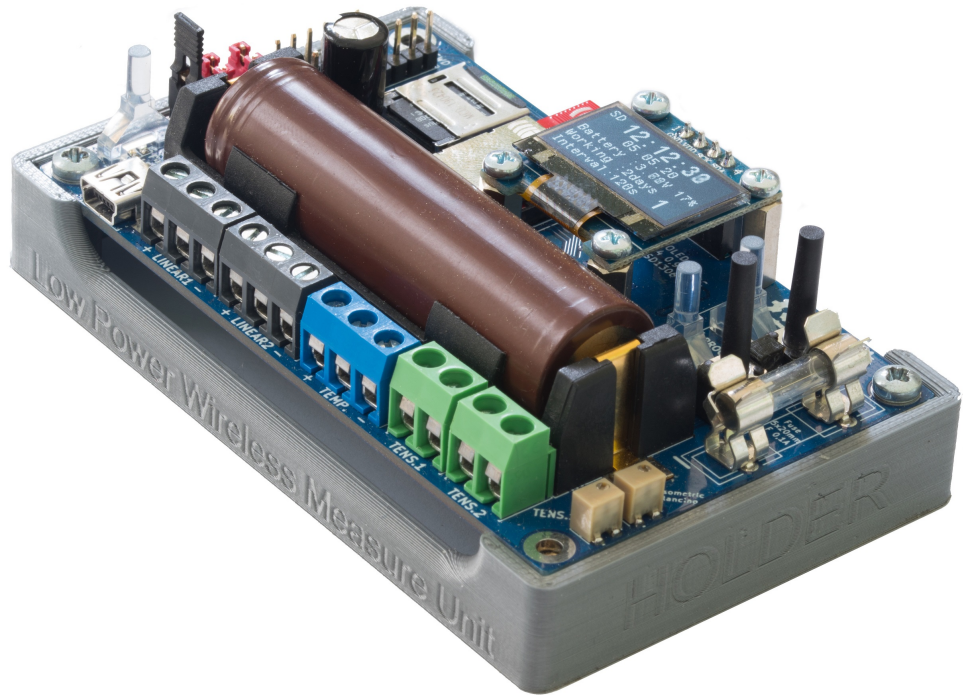


## Příloha C

### Obrázky realizace



C. Obrázky realizace









## **Příloha D**

### **Kompletní kalkulace a seznam součástí**

	Označení ve schématu	Označení	Pouzdro	Název	Počet	Ceza za kus	Cena celkem
<b>Integrované obvody</b>	U2	MCP73831-2-OT	SOT-23-5	Battery charger	1	15,66	15,66
	IC2	AD8227	SOIC-8	Přístrojový zesilovač	1	71	71
	U5	TXS0102DCT	SSOP-8	Překladač napěťových úrovní	1	18,31	18,31
	U6	FAN4174IS5X	SOT-23	Operační Zesilovač	1	10,3	10,3
	U9,U11	74AUP1G17	SOT-353	Číslicový buffer	2	5,18	10,36
	IC4	LC709203F	WDFN-8	Fuel Gauge	1	38,263	38,263
	U4	ADG849	SOT-363_SC-70-6	Analogový přepínač	1	46,48	46,48
	U7	LD3985M28R	SOT-23-5	Pevný LDO Napěťový Regulátor	1	12,702	12,702
	D1,D5,D7,D8,D10,	DT1042-04SO-7	SOT-26	ESD ochrana	5	7,805	39,025
	U8	STM32L072CBTx	LQFP	Mikrokontrolér	1	100	100
	IC5	MCP4017	SC70	Programovatelný odpor	1	12,021	12,021
	U3	BME280	LGA-8	Čidlo teploty a vlhkosti	1	132	132
	IC6	74HC4066D	SOIC	Analogový přepínač	1	7,78	7,78
	<b>Pasivní součástky</b>	C11	10nF	603	Kondenzátor	10	1,158
C9,C28,		1uF - záměna za 4u7	603	Kondenzátor			
C1,C20		1nF	1206	Kondenzátor	10	2,68	26,8
C3,C6,C10,C23,		4u7	603	Kondenzátor	100	0,31	31
C2,C4,C5,C7,C8,C12,C13,C14, C15,C16,C18,C19,C21,C22,C24, C25,C26,C27,C29,C34,C35,C36,C37		100n	603	Kondenzátor	100	0,31	31
C17		1F	D8,00mm	SuperCap 1F 3V	1	35	35
C30,C31		27p	603	Kondenzátor	100	0,38	38
C32,C33		15p	603	Kondenzátor	100	0,34	34
R1,R5		75R	603	Resistor	100	0,28	28
R2,R33		1M	1206	Resistor	100	0,2	20
R6		4k7	603	Resistor	100	0,087	8,7
R8,R22,R25,R26,R27,R32,		2k	603	Resistor	100	0,27	27
R9,R10,R14,R34,		470R	603	Resistor	100	0,19	19
R3,R4,R7,R11,R12,R13, R15,R17,R21,R23,R24,R35,R36,		100k	603	Resistor	100	0,087	8,7
R16,R18,R19,R20,R28,R29, R30,R31,R37,R38,R39,		10K	603	Resistor	100	0,27	27
RV1,RV2		100R	1801WSMD	Víceotáčkový potenciometr	2	57	114
Mezi součet :							973,68

**Tabulka D.1:** Seznam součástek integrované obvody a pasivní součástky

	Označení ve schématu	Označení	Pouzdro	Název	Počet	Ceza za kus	Cena celkem
<b>Polovodiče</b>	Y1	LFXTAL055663Reel	5x3,2mm	Krystal 8 MHz	1	17,9	17,9
	Y2	LFXTAL009678Bulk	3,2 x 1,5mm	Krystal RTC 32,768kHz	1	8,21	8,21
	D4	Dioda	D_SMC	Ochrana dioda na baterii - S5A	1	4,31	4,31
	IC3	BAR43S	TSOT-23	Signálová Schottkyho Dioda	1	5,91	5,91
	F1	Polyfuse	1206	Vratná pojistka	1	2,64	2,64
		LED	603	LED GREEN	1	1,81	1,81
	D2,D3,D6,D9	LED	603	LED RED	3	1,46	4,38
	Q1,Q2,Q6,Q8,	Q_NMOS_GSD	SOT-23	NMOS - LGE2312	4	2,24	8,96
	Q3,Q4,Q7,Q9,Q12,	Q_PMOS_GSD	SOT-23	PMOS - Si2365EDS	5	7,3	36,5
<b>Konektory a jiné</b>	BT1	Battery_Cell		BatteryHolder pro 18650	1	55,13	55,13
	F2	Fuse		Držák pojistky	2	3,79	7,58
	JP1,JP2,JP3,	Jumper		Jumper	20	1,06	21,2
	SW1,SW2	SW_Push		Uživatelské tlačítko	2	2,24	4,48
	J4,J6,	TerminalBlock 5mm 1x02		Svorkovnice - 2x - zelená	2	3,72	7,44
		TerminalBlock 5mm 1x03		Svorkovnice - 3x - modrá	1	5,65	5,65
	U1,J11,J12	TerminalBlock 5mm 1x03		Svorkovnice - 3x - černá	2	7,15	14,3
	J2,J3,J7,J8,	Pin Header			20	1,11	22,2
	J10	Micro_SD_Card		Slot na sd kartu	1	24,47	24,47
	J1	USB_B_Mini		Konektor USB B mini	1	9,92	9,92
	IC1	TR-72DA		SIM slot pro IQRF	1	43,37	43,37
	H6,H7,H8	LED PIPE FIX-LEM-180		Světlovod	3	1,87	5,61
				Konektor Deska-Deska	1	1,79	1,79
				Baterie 18650 - 18650HG2	1	152	152
				Pojistka_Battery 5x20mm	1	5,18	5,18
				OLED displej bílý 128x64 0,96 I2C	1	165	165
		AGR12 KSS WIRING		Průchodka	3	22,003	66,009
		1212X12		Distanční sloupek M2,5; 12mm	4	2,8071	11,2284
		M2.5X5/D7985		Šroub; M2,5x5;	100	0,23449	23,449
	Mezi součet :						

**Tabulka D.2:** Seznam součástek polovodiče a konektory

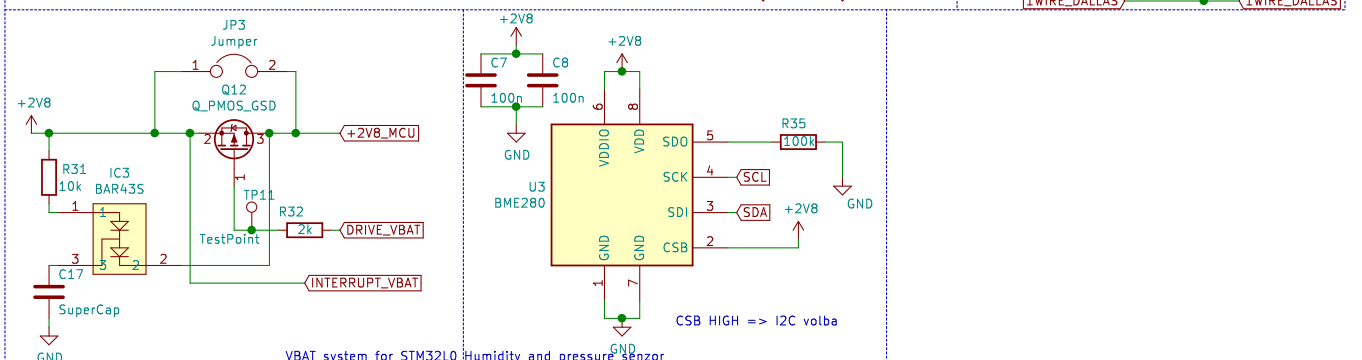
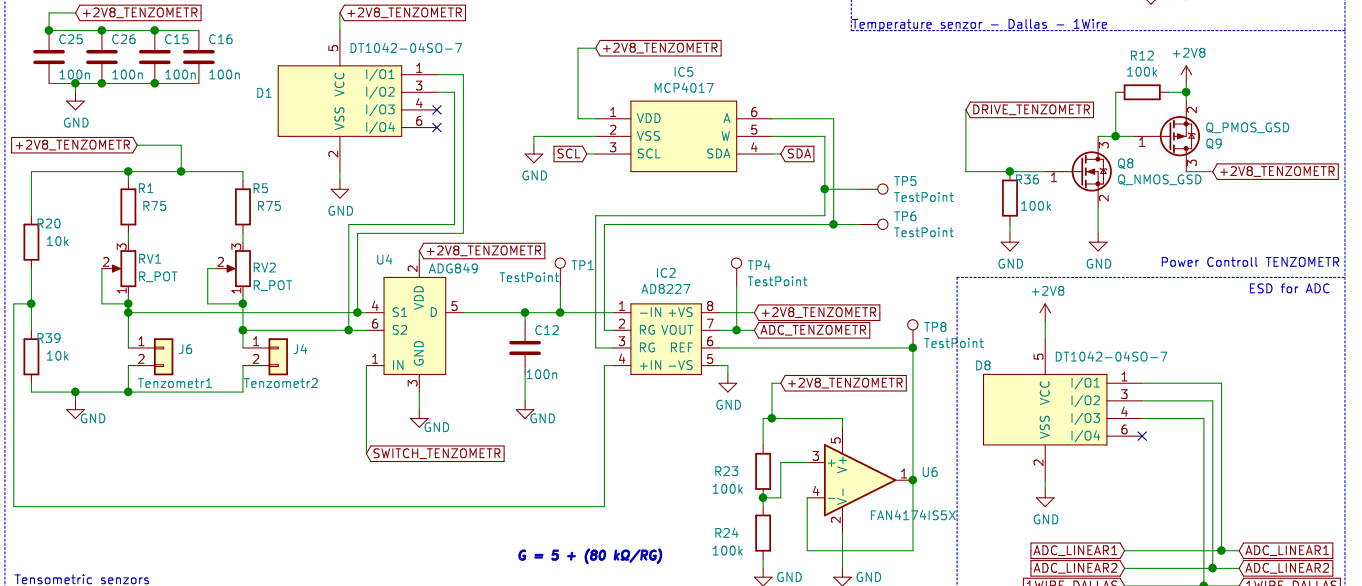
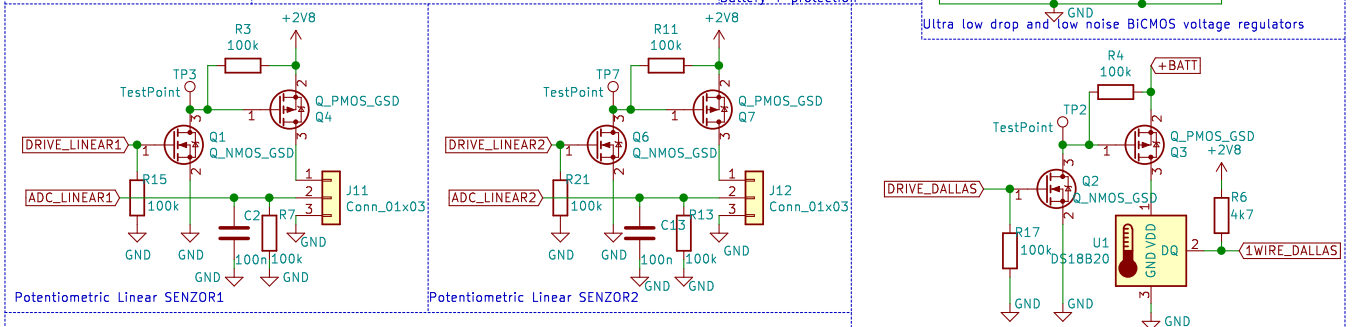
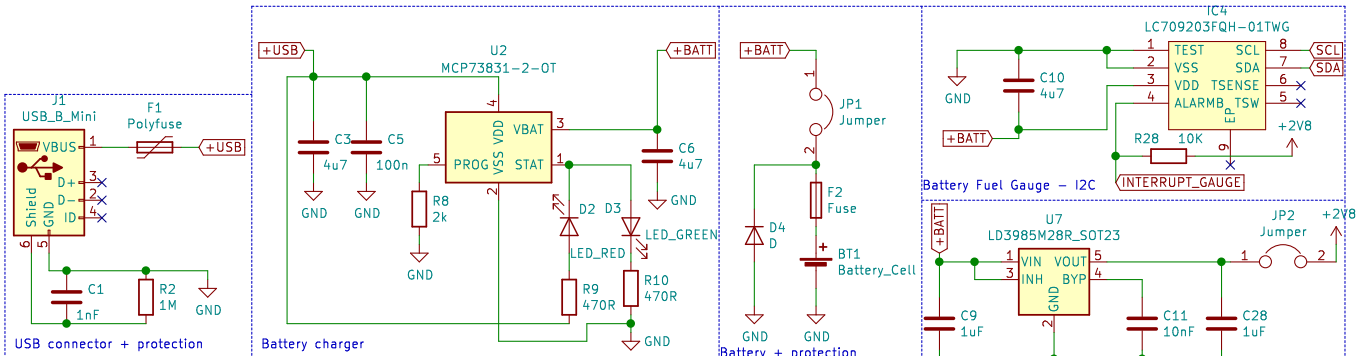






## **Příloha E**

### **Kompletní schéma zapojení**



$$G = 5 + (80 \text{ k}\Omega / R_G)$$

CSB HIGH => I2C volba

